

Reconstrucción histórica de nivel del mar en la Costa Oeste de Estados Unidos a partir de técnicas de downscaling estadístico.

Trabajo realizado por:

Ainhoa Arribas Llona

Dirigido:

Fernando J. Méndez Incera

Sonia Castanedo Bárcena

Titulación:

**Máster Universitario en Ingeniería de
Caminos, Canales y Puertos**

Santander, septiembre de 2018

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

TÍTULO:

Reconstrucción histórica de nivel del mar en la Costa Oeste de Estados Unidos a partir de técnicas de downscaling estadístico

AUTOR:

Ainhoa Arribas Llona

DIRECTORES:

Fernando J. Méndez Incera, Sonia Castanedo Bárcena

CONVOCATORIA:

Septiembre 2018

PALABRAS CLAVE:

Nivel del mar, marea meteorológica, downscaling estadístico, reconstrucción, Costa Oeste de los Estados Unidos, CFSR, 20CR, Método Análogos, modelo de regresión.

REFERENCIAS:

- Cid Carrera, Alba (2015): Modelado numérico y estadístico de la componente meteorológica del nivel del mar a escala regional y global. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria
- Pugh, David. T (1987): Tides, Surges and Mean Sea-Level, John Wiley & Sons
- Alba Cid, Paula Camus, Sonia Castanedo, Fernando J. Méndez, Raúl Medina 2016: Global reconstructed daily surge levels from the 20th Century Reanalysis (1871–2010), Global and Planetary Change 148 (2017) 9–21
- Dylan Anderson, Ana Rueda, Jose A. A. Antolinez, Laura Cagigal, Peter Ruggiero, Fernando J. Mendez (2018, en preaparación): Time-varying Emulator for Short and Long-Term Analysis of Coastal Flooding
- Subhrendu Gangopadhyay, Martyn Clark, Balaji Rajagopalan (2005): Statistical downscaling using K-nearest neighbors, Water Resources Research, Doi 10.1029/2004WR003444

RESUMEN:

El objetivo del siguiente estudio consiste en desarrollar dos modelos de downscaling estadístico para caracterizar la marea meteorológica y el nivel medio del mar mensual. Dicha modelización de las variables mencionadas ha sido llevada a cabo en 23 mareógrafos situados a lo largo de la Costa Oeste de los Estados Unidos, desde California hasta Washington.

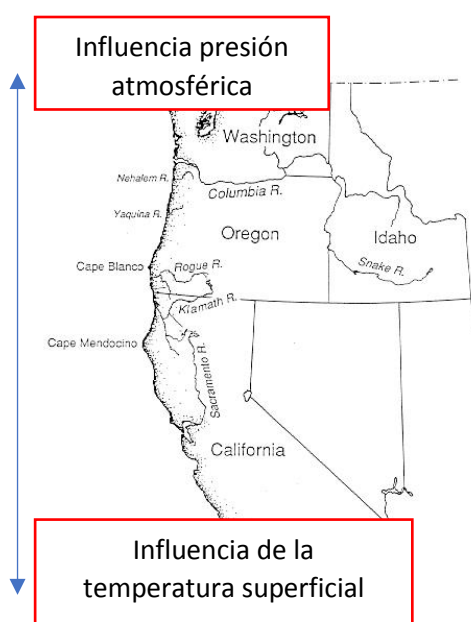
La metodología implementada en el estudio para ambas componentes del nivel del mar ha consistido en primer lugar en la creación de los modelos basados en métodos estadísticos, posteriormente se ha validado su similitud con los datos registrados a tiempo real a través de la red de mareógrafos de NOAA, y finalmente se han aplicado los modelos a otra base de datos diferente, con el fin de reconstruir históricamente la marea meteorológica, así como el nivel medio del mar mensual.

En relación a la marea meteorológica, dada su dificultad de predicción, se ha definido el resultado a través del percentil 95, 50 y 5. Para ello, se ha empleado el Método de Análogos junto con simulaciones de Monte Carlo. A través del Análisis de Análogos, se asigna al día a reconstruir el valor de la marea meteorológica en función de la similitud de la presión entre dicha fecha y el conjunto de datos de calibración disponible. Por su parte, mediante Monte Carlo se han obtenido 1000 valores de marea meteorológica para cada día dependiendo de la condición que cumpla el número aleatorio simulado. A partir de esos 1000 datos diarios se han podido definir los percentiles 5, 50 y 95 para cada día a reconstruir.

Respecto al nivel medio del mar mensual, el resultado se ha expresado mediante un único valor. Con el fin de definirlo, se ha formulado un modelo de regresión que se divide en dos partes. La primera está formada por los coeficientes asociados a la presión atmosférica a nivel del mar, mientras que la segunda hace referencia a los términos relacionados con la temperatura superficial del agua del mar.

Los resultados obtenidos muestran que para la marea meteorológica la reconstrucción no se asemeja a los datos registrados por los mareógrafos tan bien como se esperaba; no obstante, para el nivel medio del mar mensual independientemente de la localización del punto de estudio, los resultados han sido plenamente satisfactorios.

Finalmente, cabe destacar la calidad de los resultados en base a la distribución espacial de los mismos. A medida que se aleja del Ecuador, esto es, se adentra hacia Washington, la reconstrucción de la marea meteorológica se ve mejorada, mientras que en zonas próximas al sur de la Costa Oeste el modelo no es capaz de predecir la marea meteorológica correctamente. Respecto a las variables que influyen en el nivel medio del mar mensual, resulta que la presión atmosférica de la superficie tiene un mayor efecto en las zonas altas de la Costa Oeste, mientras que la importancia de la temperatura de la superficie del agua de mar es mayor en latitudes bajas.



Reconstrucción del nivel medio del mar.



Reconstrucción de la marea meteorológica

TITLE:

Historical sea level reconstruction in the West Coast of the United States based on statistical downscaling techniques

AUTHOR:

Ainhoa Arribas Llona

DIRECTORS:

Fernando J. Méndez Incera, Sonia Castanedo Bárcena

DATE:

September 2018

KEY WORDS:

Sea level, storm surge, statistical downscaling, reconstruction, West Coast of the United States, CFSR, 20CR, regression model, Analog Method.

REFERENCES:

- Cid Carrera, Alba (2015): Modelado numérico y estadístico de la componente meteorológica del nivel del mar a escala regional y global. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria
- Pugh, David. T (1987): Tides, Surges and Mean Sea-Level, John Wiley & Sons
- Alba Cid, Paula Camus, Sonia Castanedo, Fernando J. Méndez, Raúl Medina 2016: Global reconstructed daily surge levels from the 20th Century Reanalysis (1871–2010), Global and Planetary Change 148 (2017) 9–21
- Dylan Anderson, Ana Rueda, Jose A. A. Antolinez, Laura Cagigal, Peter Ruggiero, Fernando J. Mendez (2018, en preaparación): Time-varying Emulator for Short and Long-Term Analysis of Coastal Flooding
- Subhrendu Gangopadhyay, Martyn Clark, Balaji Rajagopalan (2005): Statistical downscaling using K-nearest neighbors, Water Resources Research, Doi 10.1029/2004WR003444

SUMMARY:

The goal of this report is to develop two models based on statistical downscaling, one for the storm surge levels and another one for the monthly mean sea level, in order to generate long-term series in the period 1900-2018. The procedure has been carried out in 23 tide gauges that are located along the West Coast of the United States, from California to Washington.

The methodology applied in the study for both, the storm surge and monthly mean sea level, can be divided into three steps. In the first place, the models have been created based on statistical methods, afterwards, they have been validated thanks to the data recorded by the tidal gauges from NOAA, and finally, the same methodology has been implemented to a different database so that, longer series of storm surge and monthly mean sea level are reconstructed.

In relation to the storm surge, due to the difficulty to predict it correctly, the result has been defined through the 95th, 50th and 5th percentiles calculated by the Analog Method together with Monte Carlo simulations. The Analog Method assigns to the day that is being reconstructed the value of the storm surge based on the similarity between the sea level pressure of that day and the set of the available calibration data. Regarding to the Monte Carlo analysis, a thousand storm surge results have been obtained for each day depending on the condition that meets the simulated random number. In such a way, thanks to those thousand results per day the percentiles previously mentioned have been defined.

According to the monthly mean sea level, the result has been expressed through the central estimate. In order to define it, a multivariate linear regression model that consists on coefficients associated to the sea level pressure and sea surface temperature indexes has been formulated.

The results obtained show that the storm surge's reconstruction model does not adjust to the data recorded by the tide gauges as well as it was expected. Nevertheless, for the monthly mean sea level the results have been fully satisfactory in all the locations reinforcing the ability of the methodology.

Finally, it is well worth highlighting the quality of the results depending on their spatial distribution. As it moves away from the equator, that is, as it reaches Washington State, the storm surge's reconstruction model improves, while in the areas near the south of the West

Coast, it is not able to predict the storm surge properly. Regarding to the monthly mean sea level, it turns out that the sea level pressure has a greater effect in the high areas of the West Coast, while the importance of the sea surface temperature is higher in low latitudes.

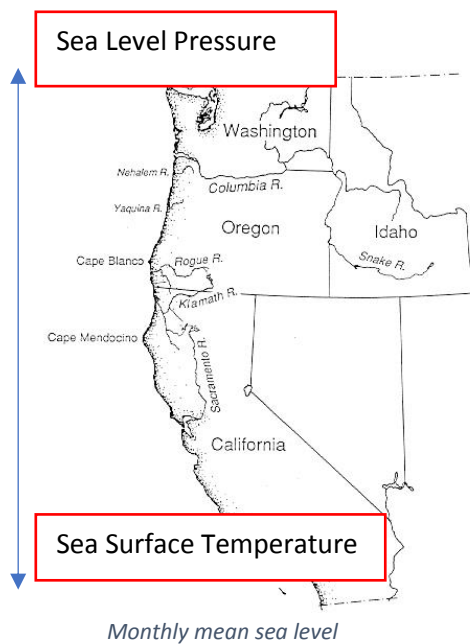


Tabla de contenido

1.	Introducción	3
1.1	Relevancia	3
1.2	Estado del arte	5
1.3	Objetivos	7
1.4	Estructura del documento.....	8
2.	Base datos	9
2.1	Datos de mareógrafos.....	9
2.2	Datos de presión atmosférica	10
2.3	Datos de temperatura de superficie del mar.....	11
3.	Metodología	12
3.1	Marco conceptual	12
3.1.1	Marea astronómica	12
3.1.2	Marea meteorológica.....	14
3.1.3	Variaciones del nivel medio del mar	18
3.1.4	Componentes del nivel del mar	20
3.2	Esquema general.....	22
3.2.1	Marea meteorológica (MM).....	23
3.2.2	Nivel medio del mar mensual (NMMM)	32
4.	Resultados	41
4.1	Marea meteorológica y validación.....	41
4.2	Nivel medio del mar mensual y validación	43
5.	Aplicación en 20CR.....	46
5.1	Marea meteorológica.....	47
5.2	Nivel medio del mar mensual	50
6.	Conclusiones.....	54
7.	Bibliografía	57
	APÉNDICE 1	58
	APÉNDICE 2	58

1. Introducción

1.1 Relevancia

Según estudios recientes, los últimos registros de mareógrafos y las mediciones por satélite demuestran que a lo largo del siglo pasado el Nivel Medio del Mar aumentó entre 10 y 20 centímetros, siendo la tasa anual de aumento durante los últimos 20 años de 3,2 milímetros, más o menos el doble de la velocidad media de los 80 años precedentes.

Este incremento es achacado al calentamiento global originado por el cambio climático, el cual provoca el aumento del nivel del mar desde tres frentes diferentes:

- La dilatación térmica del agua: El agua al aumentar la temperatura y calentarse, tiende a expandirse, por lo que ocupa un mayor espacio en los océanos.
- Deshielo de los glaciares y casquetes polares: Las grandes formaciones de hielo en forma de glaciares y casquetes polares se derriten sin volver luego a su forma natural. Habitualmente estas gigantescas estructuras heladas se deshacían parcialmente durante el verano, pero recuperaban su estado sólido al volver las temperaturas invernales. Hoy en día, a causa del calentamiento global, las precipitaciones de nieve son más suaves, los inviernos se retrasan y las primaveras se adelantan, de manera que el hielo no se vuelve a unir en la misma forma y cantidad.
- Filtración de agua dulce: Este último factor está muy relacionado con el deshielo de los glaciares y casquetes polares. Estas formaciones son de agua dulce, por lo que al derretirse se produce una filtración de agua dulce de la superficie al mar que actúa como lubricante para las corrientes de hielo, ayudando a que éstas se debiliten, derritan y deslicen con mayor rapidez.

Por lo que respecta a las consecuencias atribuidas al calentamiento global, el más notorio es el aumento del nivel del mar. El agua invade cada vez más las zonas costeras, lo que provoca la erosión del terreno e inundación de los humedales; acarreando problemas de contaminación de acuíferos, afecciones a la flora y fauna, daños en infraestructuras de defensa

costera, etc. Por ello, queda en evidencia la necesidad de cuantificar las futuras elevaciones que sufrirá el nivel del mar, así como las disminuciones de cota.

Gracias a los mareógrafos, se puede caracterizar el nivel del mar. Sin embargo, bien a causa de las paradas de mantenimiento o bien debido a las interrupciones operacionales durante oleajes extremos, los mareógrafos muestran huecos en las series temporales registradas, por lo que no son lo suficientemente útiles para reconocer adecuadamente las variaciones del mar a lo largo del tiempo.

Cabe destacar también, que el nivel del mar está conformado por diferentes componentes, tales como la marea astronómica, marea meteorológica, fluctuaciones climáticas como El Niño y La Niña, alteraciones relacionadas con la subida del nivel del mar, etc. El análisis de dichas componentes se puede realizar de manera determinista, como es el caso de la marea astronómica, o indeterminista, siendo un claro ejemplo la marea meteorológica.

Así pues, ha sido necesaria la implantación de modelos numéricos y estadísticos para la correcta cuantificación de las variaciones del nivel del mar. En este trabajo se centrará concretamente en la generación de modelos estadísticos para describir las componentes de marea meteorológica y nivel medio del mar mensual, de modo que se ahorre tiempo y costes computacionales frente a los modelos numéricos.

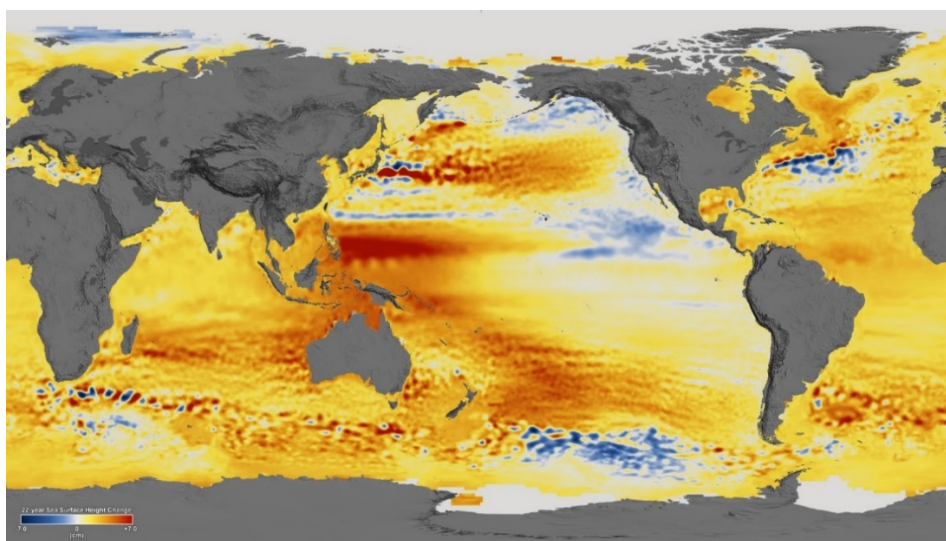


Figura 1: Aumento, en rojo $\approx 3\text{mm/año}$ y descenso, en azul $\approx -3\text{mm/año}$ del nivel medio del mar en los últimos 22 años.

1.2 Estado del arte

Tal y como se acaba de mencionar, es de gran utilidad cuantificar y reconstruir históricamente las series de nivel del mar para poder conocer cómo ha variado su magnitud en el pasado y cómo se espera que varíe en un futuro.

Para la obtención de registros, se ha hecho uso de mareógrafos, que son unos aparatos situados en la línea de costa y que efectúan medidas continuas de la superficie instantánea del mar; o de satélites altimétricos, los cuales miden la altura del satélite con respecto a la superficie instantánea del mar desde 1990. La ventaja de los satélites frente a los mareógrafos es que las medidas no se limitan a unos cuantos puntos de costa, sino que abarcan toda la superficie de mar. Sin embargo, la cobertura temporal de los mareógrafos es mucho mayor, ya que existen registros en determinadas localizaciones de más de 100 años.

No obstante, no resultan útiles a la hora de obtener series completas a lo largo del tiempo. Por ello, cada vez se requiere más de modelos numéricos y estadísticos que reproduzcan el nivel del mar.

Modelos numéricos

En la última década, muchos estudios han tenido como objetivo cuantificar la marea meteorológica mediante bases de datos generadas numéricamente. Estas bases de datos han sido útiles en los trabajos que se mencionan a continuación:

Flather et al. (1998) simularon en 2D la marea meteorológica para la plataforma continental del noroeste de Europa, con el fin de caracterizar los valores extremos de la misma. Marcos et al. (2009) realizó un estudio similar, en el que se empleó la base de datos numérica generada por Ratsimandresy et al. (2008) para comparar los valores extremos de la marea meteorológica obtenidos con dicho modelo y los mareógrafos. Bernier and Thompson (2006) también propusieron un modelo numérico que analiza la frecuencia de los valores extremos de la marea meteorológica en el noroeste del Atlántico. Butler et al. (2007) abordó durante décadas la relación existente de la marea meteorológica captada a través de los mareógrafos y los resultados obtenidos a partir del modelado numérico.

Otra línea de investigación que se ha llevado a cabo es el efecto del cambio climático en la marea meteorológica a través de modelos numéricos. Wang et al. (2008) lo empleó para cuantificar la magnitud y la frecuencia de la marea meteorológica en aguas irlandesas. Lowe et al. (2001) se centraron en el comportamiento de la marea meteorológica frente a futuros escenarios de cambio climático en el Reino Unido. Woth et al. (2006) lograron agrupar los extremos de marea meteorológica en el Mar del Norte a partir de modelos climáticos regionales.

En relación a los pronósticos de la marea meteorológica, Ratsimandresy et al. (2008) y Jordà et al. (2012) modelaron dicha marea entre 1958-2001 (ahora extendido hasta 2008) mediante un modelo barotrópico (modelo HAMSON, Backhaus 1985) con datos de partida de viento y presión extraídos desde el “National Center for Environmental Prediction”, NCEP.

Hoy en día, se está centrando en aumentar la resolución de los forzamientos atmosféricos en el modelado numérico (Brown et al. 2010; Eric Jones and Davies, 2006; Wang et al., 2008). De esta manera, gracias a este aumento de resolución se podrán caracterizar más detalladamente las componentes del nivel del mar.

Modelos estadísticos

Una posible alternativa a los modelos numéricos son los estadísticos, especialmente cuando se está interesado en reproducir la marea meteorológica en un amplio dominio espacial y durante un largo período de tiempo, como es el caso de este estudio. Cabe destacar una clara ventaja en el ahorro de esfuerzo y tiempo computacional en comparación a los modelos numéricos.

En el clima u otras variables oceánicas, las diferentes técnicas de reconstrucción estadística son ampliamente utilizadas, sin embargo, su aplicación en reconstrucción de nivel del mar ha sido más reducida. En general, las técnicas de downscaling estadístico se pueden clasificar en: funciones de transferencia, “weather types” y generadores de climatología estocásticos (Giorgi et al., 2001).

Con respecto al clima marítimo, se han empleado funciones de transferencia lineal (modelos de regresión) para obtener la altura significativa de olas a escala global y regional

(Wang et al., 2012). No solo eso, también se ha propuesto un modelo “weather type” con el fin de modelar el clima marítimo multivariado (Camus et al. 2014b, Espejo et al. 2014, Cid et al. 2016).

Además de para el clima marítimo, se ha hecho uso de métodos estadísticos para reconstruir el nivel del mar en el Mediterráneo mediante análisis de interpolación (Calafat et Gomis, 2009). Para la componente meteorológica específicamente, Dangenford et al. (2014) propusieron formulaciones estadísticas empíricas para modelar el comportamiento a largo plazo de la marea meteorológica a partir de datos de viento en el Mar del Norte (Müller-Navarra y Giese, 1999).

1.3 Objetivos

El objetivo principal del siguiente documento es reconstruir series históricas del nivel del mar a partir de métodos estadísticos, concretamente las series de la marea meteorológica y nivel medio del mar mensual. Para ello, se ha cumplido con los objetivos específicos que se detallan a continuación:

- a) Creación de dos modelos estadísticos, uno para la marea meteorológica y otro para el nivel medio del mar mensual, de tal forma que se encuentre la relación existente entre dichas componentes del nivel del mar y el forzamiento atmosférico que los origina.
- b) Aplicación del modelo creado a otra base de datos, con el fin de comprobar y validar su comportamiento además de poder obtener series de nivel de mar más largas en el tiempo, de modo que sirvan para líneas de investigación relacionadas con la variabilidad climática.

El estudio se aplica a las localizaciones de los mareógrafos situados a lo largo de la Costa Oeste de los Estados Unidos, desde California hasta Washington. Los mareógrafos analizados son 23, siendo la amplitud de la escala temporal de los datos registrados muy variable entre

ellos. En San Francisco se extraen datos desde 1898, mientras que en Cape Disappointment (Washington) desde 2015.

1.4 Estructura del documento

La organización del documento se ha realizado de la siguiente manera:

- Sección 1: Se ha elaborado una breve descripción acerca de la importancia de la reconstrucción y cuantificación del nivel del mar, así como del estado del arte actual y objetivos a cumplir en este estudio.
- Sección 2: Se detallan las características de las bases de datos a partir de las cuales han sido desarrollados los modelos de reconstrucción.
- Sección 3: En primer lugar, se desarrolla el marco conceptual para describir los conocimientos necesarios para el entendimiento del trabajo. A continuación, se desarrolla la metodología implementada en ambos modelos para reconstruir la marea meteorológica y el nivel medio del mar mensual.
- Sección 4: Se muestran los resultados obtenidos de la ejecución del modelo a partir de la base de datos de Climate Forecast System Reanalysis (CFSR).
- Sección 5: Con el fin de aplicar los modelos de reconstrucción a otras bases de datos y así poder verificar su validez, se ha ejecutado el mismo para la fuente 20th Century Reanalysis (20CR).
- Sección 6: Se resumen las conclusiones obtenidas a lo largo del estudio y se marcan las futuras líneas de investigación.
- Sección 7: Bibliografía de la información recopilada para la realización del trabajo.
- Sección 8: Se añaden los apéndices con los resultados de la base de datos del CFSR para la marea meteorológica y el 20CR para el nivel medio del mar en cada mareógrafo estudiado.

2. Base datos

Los principales datos de partida empleados para el desarrollo de series de la marea meteorológica y el nivel medio del mar mensual en los 23 puntos de estudio de la Costa Oeste de los Estados Unidos son la presión atmosférica, la temperatura de la superficie del mar e información obtenida de los propios mareógrafos.

Dicha información ha sido extraída desde las fuentes que se describen a continuación. Cabe destacar que como los datos de partida pertenecen a distintas bases de datos, hay que poner especial atención en la resolución de cada una de ellas a la hora de crear las mallas de estudio.

2.1 Datos de mareógrafos

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el estudio de reconstrucción de ambos niveles se centra en 23 estaciones de mareógrafos situados en la Costa Oeste de los Estados Unidos. La información de cada mareógrafo ha sido obtenida de la base de datos del *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*.

Así pues, se han extraído datos horarios de la superficie libre del mar para cada localización. A causa de los periodos de inoperatividad de los mareógrafos bien por rotura o bien por mantenimiento, y que las estaciones se pusieron en funcionamiento en diferentes años, la escala de tiempo disponible en cada uno de ellos variará.

En la siguiente tabla se citan los mareógrafos de estudio, detallando su latitud y longitud exacta, así como su escala de tiempo.

Station	Longitude	Latitude	From	To
San Diego	117.17	32.71	26/01/1906	31/10/2017
La Jolla	117.26	32.87	01/08/1924	31/10/2017
Los Angeles	118.27	33.72	29/11/1923	31/10/2017
Santa Mónica	118.50	34.01	22/11/1973	31/10/2017
Santa Bárbara	119.69	34.40	01/08/1979	31/10/2017
Oil Platform Harvest	120.68	34.47	14/05/1992	31/10/2017
Port San Luis	120.75	35.17	01/01/1948	31/10/2017
Monterey	121.89	36.61	08/11/1973	31/10/2017
San Francisco	122.47	37.81	01/01/1898	31/10/2017
Bolíñas Lagoon	122.68	37.91	01/07/2009	31/10/2017
Point Reyes	122.98	38.00	12/01/1975	30/09/2017
Arena Cove	123.71	38.92	01/08/1979	30/09/2017
North Spit	124.22	40.77	16/08/1977	30/09/2017
Crescent City	124.19	41.75	11/04/1933	30/09/2017
Port Orford	124.50	42.74	01/08/1978	30/09/2017
Charleston	124.32	43.35	06/03/1970	31/10/2017
South Beach	124.05	44.63	01/02/1967	31/10/2017
Garibaldi	123.92	45.56	21/03/1970	31/10/2017
Cape Disappointment	124.05	46.28	01/01/2016	30/09/2017
Toke Point	123.97	46.71	06/11/1972	30/09/2017
Westpoint	124.11	46.90	01/01/2007	30/09/2017
La Push	124.64	47.91	01/01/2005	30/09/2017
Neah Bay	124.60	48.37	01/08/1934	30/09/2017

Tabla 1: Posición geográfica y escala temporal de los mareógrafos de la Costa Oeste de los Estados Unidos.

2.2 Datos de presión atmosférica

Se han empleado dos fuentes de presión atmosférica con dos objetivos diferentes. En primer lugar, mediante la base de datos del *Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)* se han generado los modelos de marea meteorológica y nivel medio del mar mensual, y una vez creados los modelos, se ha verificado el comportamiento de dichos modelos a través de las presiones extraídas desde la base de datos de reanálisis *Twentieth Century Reanalysis V2 (20CR)*.

En referencia al CFSR, su escala de tiempo abarca desde el 1 de enero de 1979 hasta el 31 de diciembre del 2010. La recopilación de datos se ha realizado mediante la generación de una malla de 400x400 km centrado en cada mareógrafo, teniendo una resolución de 0.5°. Así pues, se han grabado 9x9 puntos de datos diarios desde 1979 hasta 2010 para cada estación. No obstante, en los procesos siguientes los puntos de la malla que quedan en tierra han sido descartados para la construcción de los modelos. En la figura (2) adjunta se muestra la malla empleada para San Diego.

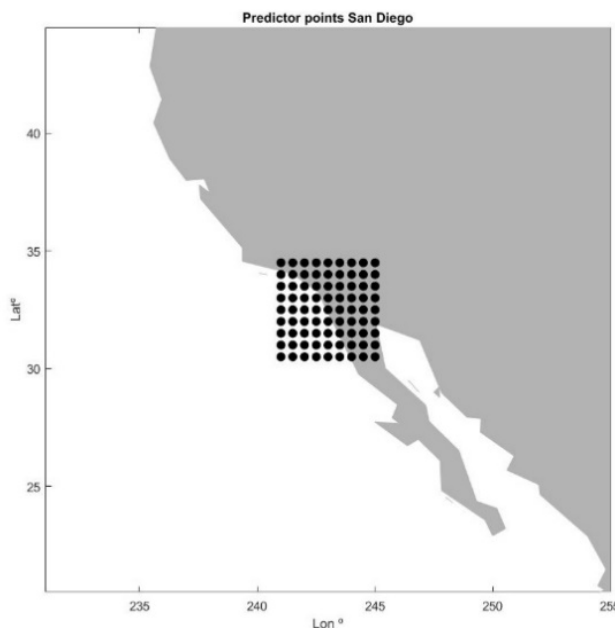


Figura 2: Representación de la malla en San Diego.

Respecto al 20CR, aunque su resolución espacial es más grosera, su escala de tiempo abarca un periodo mayor, ya que comienza el 1 de enero del 1900 y finaliza el 31 de diciembre del 2010; por consiguiente, las series de marea meteorológica y nivel medio del mar mensual que se reconstruirán tendrán más información. No obstante, la resolución de la malla creada de 400x400 km es de 2°, por lo que el número de datos diarios recopilados se ve disminuida a una matriz 3x3. Al igual que para el CFSR, los puntos situados tierra adentro han sido descartados.

2.3 Datos de temperatura de superficie del mar

Para la construcción del modelo del nivel medio del mar mensual han sido necesarios datos de anomalías mensuales de temperatura superficial de agua del mar. Para ello, han sido extraídos datos anuales de la fuente de *Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) v4* a través de una malla rectangular con dimensiones desde 120° E hasta 280 °E y 5°N hasta 5°S de 2.5° de resolución. La escala de tiempo de la fuente comienza el 1 de octubre de 1880 y finaliza el 1 de octubre del 2016.

3. Metodología

En el siguiente apartado se describen los conceptos básicos que caracterizan el nivel del mar, así como los pasos seguidos para la construcción de los modelos de marea meteorológica y nivel medio del mar mensual.

3.1 Marco conceptual

Las dos componentes más importantes del nivel del mar son la marea astronómica, la marea meteorológica y las variaciones mensuales del mismo.

3.1.1 Marea astronómica

La marea astronómica es la variación del nivel del mar resultante de los efectos gravitacionales de la Luna, Sol, Tierra, así como la rotación de la última, sin ningún tipo de influencias atmosféricas.

Debido a la relativa proximidad de la Tierra y la Luna, la Luna es el cuerpo astronómico que más influye en las mareas astronómicas. Así pues, la amplitud y el periodo de mareas dependen de la posición del Sol y la Luna con respecto a la Tierra.

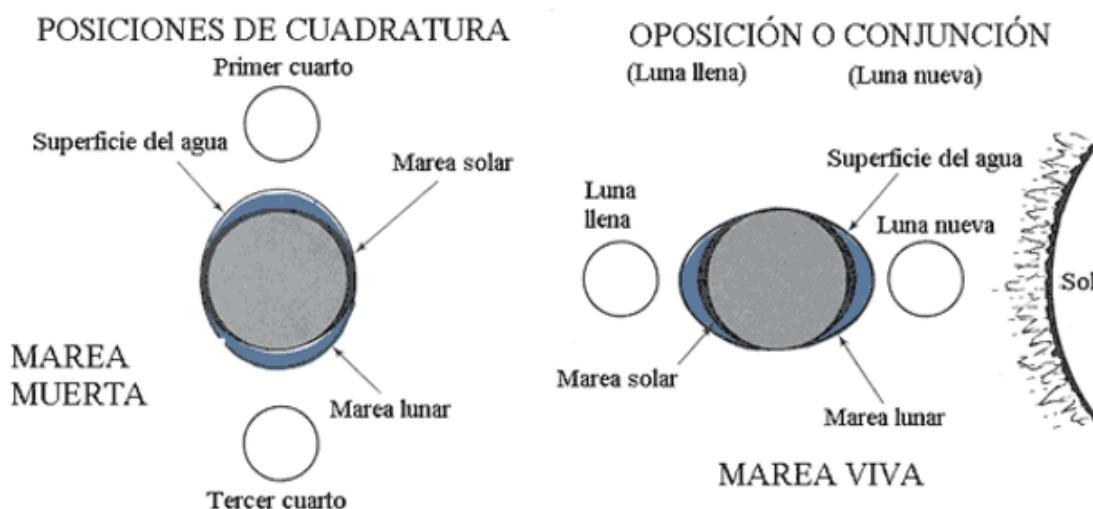


Figura 3: Interacción tierra-luna-sol

El estudio de la marea astronómica puede abordarse desde tres puntos de vista:

- I. Teoría de equilibrio de Newton (1686) basado en las fuerzas generadoras de la marea.
- II. Teoría dinámica (Laplace, Bernouilli, Euler): Resolución de las ecuaciones fundamentales de la hidrodinámica.
- III. Análisis armónico: Basado en las componentes periódicas de la marea.

El análisis de armónicos es el método más práctico para el estudio de la marea astronómica. Se basa en el conocimiento de que la marea observada está formada por un número de componentes armónicas cuyos periodos han sido perfectamente establecidos y que coinciden con los períodos de algunos de los movimientos astronómicos relativos entre tierra-sol-luna.

Así pues, en el análisis de armónicos, la marea astronómica queda definida mediante la siguiente expresión:

$$\eta(t) = a_0 + \sum_{n=1}^k a_n \cos(w_n t + \beta_n)$$

donde:

- a_0 es el nivel medio.
- a_n es la amplitud de onda de la componente n .
- w_n es la frecuencia de la onda componente n .
- β_n es el desfase de la onda componente.
- t es el instante en que se calcula la marea.
- K es el número de componentes consideradas.

Por tanto, se trata de un análisis determinista que permite obtener el valor de la marea astronómica en una localización determinada para cualquier instante en el tiempo. Los parámetros de amplitud (a_n) y período (w_n) de onda de cada uno de los armónicos que componen la marea astronómica son conocidos y dependen de la ubicación de la zona a estudio, concretamente de su longitud y latitud.

Entre los distintos armónicos de los que está constituida la marea astronómica, cabe destacar las componentes que se recogen en la tabla (2), que son las que cuentan con una mayor amplitud y por ende las que mayor influencia tienen sobre dicha marea:

		Símbolo	Periodo (hora solar)	Importancia relativa
<i>Semidiurno</i>	<i>Lunar Principal</i>	M_2	12.42	100
	<i>Solar Principal</i>	S_2	12	47
	<i>Elíptico lunar mayor</i>	N_2	12.66	19
	<i>Semidiurno Lunisolar</i>	K_2	11.97	13
<i>Diurno</i>	<i>Diurno Lunisolar</i>	K_1	23.93	58
	<i>Diurno Lunar Principal</i>	O_1	25.82	42
	<i>Diurno Solar Principal</i>	P_1	24.07	19
	<i>Elíptico lunar mayor</i>	Q_1	26.87	8
<i>Largo Periodo</i>	<i>Quincenal Lunar</i>	M_f	327.9	17
	<i>Mensual Lunar</i>	M_m	661.3	9
	<i>Semi-anual Solar</i>	S_{sa}	4383	8
	<i>Anual Solar</i>	S_a	8759	1
	<i>Marea Nodal</i>	M_n	16,6 años	

Tabla 2. Componentes principales de la marea astronómica en San Diego

3.1.2 Marea meteorológica

Por su parte, la marea meteorológica, incluye la variación que experimenta el nivel del mar a causa de las tensiones tangenciales inducidas por el viento y las variaciones espaciales de los campos de presión atmosférica a nivel del mar.

La acción del viento sobre la superficie del mar da lugar a un rozamiento entre el viento y el mar que origina unas tensiones tangenciales sobre la superficie de este último. A su vez, esas tensiones tangenciales en superficie arrastran las partículas de agua, provocando una acumulación de agua y una elevación del nivel del mar en determinadas zonas.

Por otro lado, la superficie del mar también va a estar sometida a presiones atmosféricas que van a ocasionar variaciones en el nivel del mar. Aquellas zonas que se encuentren bajo los efectos de una borrasca experimentarán una sobreelevación de nivel, mientras que en las zonas de anticiclón el nivel del mar sufrirá un descenso. Asimismo, a la hora de abordar el estudio de la marea meteorológica se debe tener en cuenta que la influencia sobre el nivel de los campos de presión predominará frente a la acción del viento en el océano abierto. Por el contrario, en zonas próximas a la costa ocurrirá lo contrario y la acción del viento cobrará mayor importancia en la determinación de la marea meteorológica que la presión atmosférica a nivel del mar.

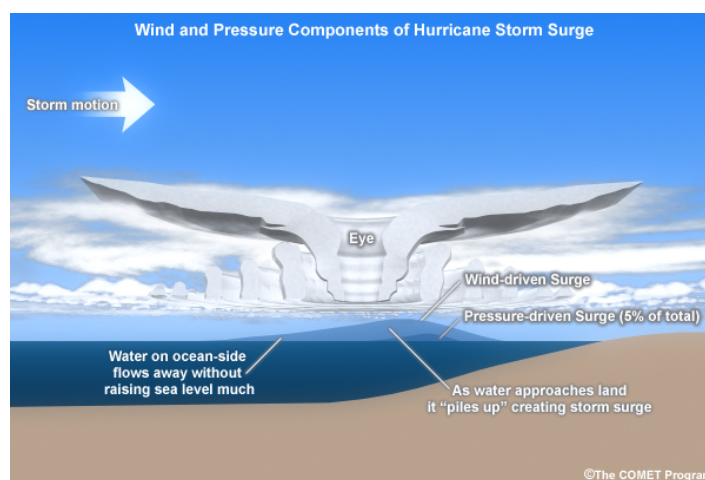


Figura 4: Influencia de la presión y viento en la marea meteorológica.

Una de las principales diferencias en el cálculo de la marea astronómica y la marea meteorológica, es que el estudio de la marea meteorológica no es un estudio determinista. Por ello, la determinación de su valor resulta mucho más compleja y no es posible predecir cuál va a ser su valor en base a los registros que se tengan de años anteriores. Para su estudio, suele ser necesario o bien modelizarlo o bien hacer uso de instrumentos de medición. No obstante, para obtener una primera idea de la magnitud de dichas acciones existen fórmulas simplificadas cuando se asumen ciertas hipótesis concretas.

Para el incremento del nivel debido al viento, se pueden diferenciar dos casos, uno con el fondo horizontal y otro de fondo de pendiente constante:

a) Fondo horizontal

$$\frac{\eta(x)}{h_0} = \sqrt{1 + \frac{2Ax}{l}} - 1$$

Siendo un parámetro tal que $A = \frac{n \tau_{xz}(\eta) l}{\rho g h_0^2}$, l la longitud de onda, τ_{xz} la tensión tangencial y h_0 el calado.

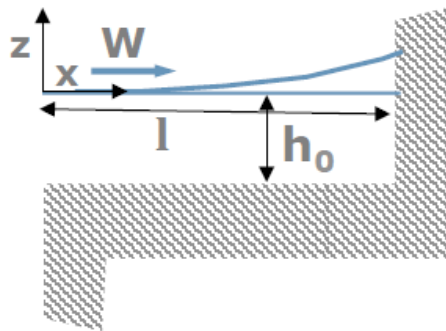


Figura 5: Esquema fondo constante.

b) Fondo de pendiente constante

$$\frac{x}{l} = \left(1 - \frac{h + \eta}{h_0}\right) - A * \ln\left(\frac{\frac{h + \eta}{h_0} - A}{1 - A}\right)$$

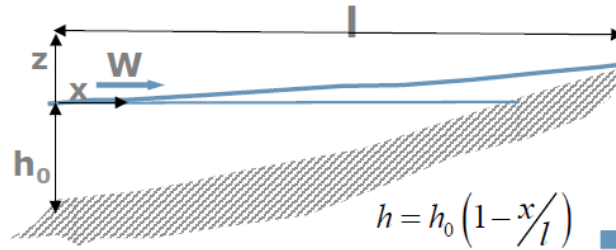


Figura 6: Esquema fondo con pendiente constante.

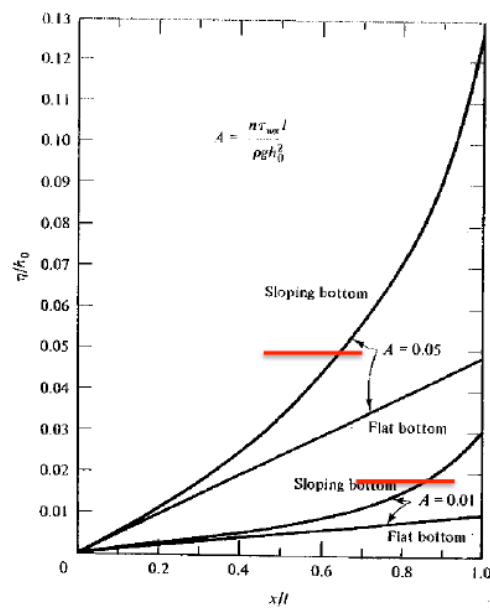


Figura 7: Marea meteorológica en función de la pendiente del fondo marino.

Con relación a la influencia de la presión en la marea meteorológica, si se supone que la borrasca que eleva el nivel es estática, el cálculo se simplifica a:

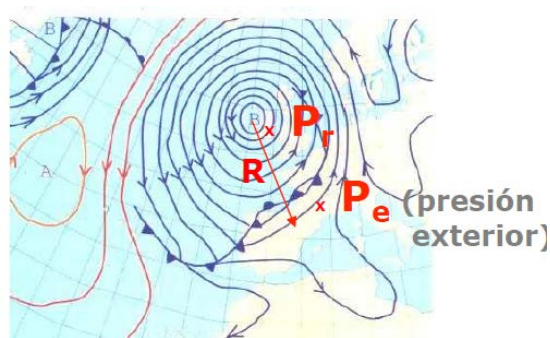


Figura 8: Representación de una borrasca, marcando su radio, presión exterior y presión en el radio de la misma.

$$\eta = 9,85(P_e - P_0) \left(1 - e^{-\frac{(R-r)}{r}} \right)$$

Siendo P_0 la presión en el centro de la borrasca, R el radio y r el punto donde se quiera calcular la sobreelevación.

Por consiguiente, es evidente que la magnitud de la marea meteorológica es función de la localización geográfica. En España, la marea meteorológica en el Mediterráneo puede llegar a alcanzar el metro mientras que en el Atlántico solamente asciende al medio metro.

3.1.3 Variaciones del nivel medio del mar

Además de la marea astronómica y la marea meteorológica el nivel del mar también se ve afectado, aunque puede que sea en menor medida, por acciones no periódicas y la subida del nivel del mar. Las primeras engloban variaciones en la densidad del agua del mar, las fluctuaciones climáticas como El Niño Southern Oscillation (ENSO) o circulaciones de corrientes marinas (eddies); mientras que la subida del nivel del mar se refiere al incremento del nivel debido al aumento del volumen de agua en los océanos. Este aumento de volumen es atribuido al cambio climático global debido a la expansión térmica que sufre el agua por el calentamiento de los polos.

En relación al ENSO cabe realizar una breve descripción del fenómeno, ya que en la parte baja de la Costa Oeste de los Estados Unidos tendrá una gran influencia en la temperatura de la superficie del agua de mar.

El ENSO es un fenómeno climatológico que se produce por la interacción climática entre el océano y la atmósfera que implica temperaturas oceánicas fluctuantes. Dentro de este fenómeno se distinguen a su vez dos estados: El Niño, que representa la fase de calentamiento y La Niña que representa el enfriamiento periódico. La duración de estas fluctuaciones de temperatura suele ser aproximadamente de 9-12 meses, siendo más frecuentes los periodos de calentamiento que los de enfriamiento.

Cuando no se está produciendo El Niño, el estado del océano Pacífico se caracteriza por la existencia de vientos alisios desde el este hacia el oeste, que empujan el agua caliente superficial del océano hacia el oeste. Por tanto, se produce una acumulación de agua caliente en la zona oeste del océano cerca de Asia, mientras que, en la zona oriental del océano, cerca de América Central y del Sur, este desplazamiento del agua superficial hace que las aguas frías del fondo sean empujadas hacia la superficie. Se establece así un gradiente de temperatura a través del Pacífico Ecuatorial, con agua caliente al oeste y agua fría al este.

De la misma manera, la interacción del agua superficial del océano y la atmósfera hace que el aire en la zona del oeste esté más caliente y ascienda generando lluvias y tormentas en esa zona. La circulación del aire atmosférico se producirá de oeste a este, con el aire caliente ascendiendo por el oeste y el aire frío descendiendo por el este.

El fenómeno de El Niño se produce cuando bajo condiciones adecuadas, se produce un debilitamiento de los vientos alisios. Este debilitamiento provoca una reducción en la cantidad de agua superficial caliente que es empujada al oeste y en la cantidad de agua fría que aflora a la superficie en el este. Partes del océano que son frías durante la época habitual, sufren un pequeño calentamiento y el gradiente de temperaturas en el Pacífico Ecuatorial entre el este y el oeste se ve alterado. Asimismo, esas variaciones en el régimen de temperaturas hacen que la temperatura en la parte central del océano sea más templada y que por consiguiente el clima nublado y lluvioso se desplace al centro del océano.

En definitiva, el debilitamiento de los vientos alisios y las variaciones en la circulación y movimiento del agua cambian el patrón de lluvias en el Pacífico y en los ciclos de viento. Durante el fenómeno de El Niño, la circulación del aire deja de producirse de oeste a este, para adoptar un recorrido que parte del centro del océano hacia el este y oeste simultáneamente. Todo ello genera cambios drásticos en la temperatura y en el clima alrededor del mundo.

Los principales efectos causados por El Niño son los siguientes:

- Aumento drástico del riesgo de inundaciones en el este.
- Aumento de riesgo de sequía en el oeste.

- Épocas de grandes lluvias en la parte oriental del pacífico y un clima muy seco en la parte occidental (India, Indonesia).
- El calor adicional en la superficie del océano libera gran parte de la energía a la atmósfera, causando un aumento de temperaturas a lo largo de todo el mundo.

Después del periodo de El Niño, los vientos alisios vuelven a su régimen normal, estableciéndose en el océano Pacífico la circulación de agua superficial y aire habituales. Sin embargo, hay veces en las que el proceso se invierte, los vientos alisios se fortalecen y al Niño le sigue el fenómeno conocido como La Niña. El incremento de la fuerza de los vientos alisios aumenta el empuje sobre el agua superficial del océano, haciendo que los volúmenes de agua desplazados sean mayores y las condiciones del clima más extremas. Los efectos producidos por este fenómeno son los opuestos a los causados por El Niño: sequías en el Pacífico Ecuatorial oriental e inundaciones en el Pacífico Ecuatorial occidental.

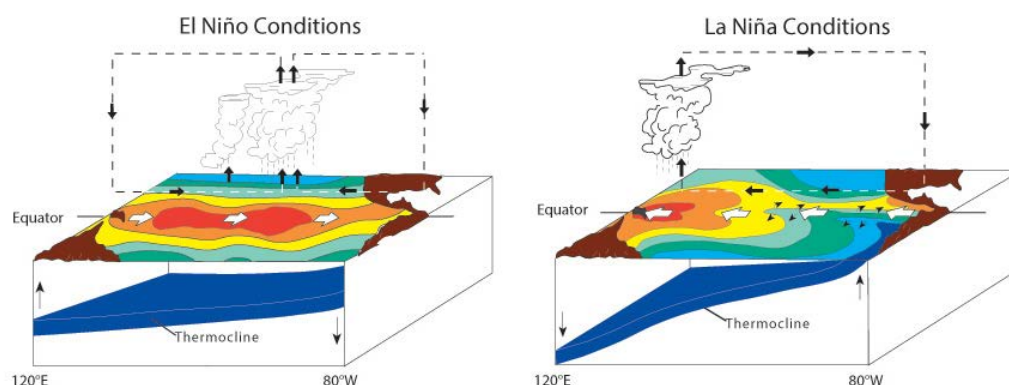


Figura 9: Fluctuaciones climatológicas de El Niño y La Niña

3.1.4 Componentes del nivel del mar

Para resumir todas las componentes del nivel del mar, en la figura 10 se engloban todos los elementos descritos anteriormente. Cabe destacar que no se ha hecho mención alguna sobre la incidencia del oleaje (Wave Run up) en el nivel del mar cuando éste se propaga hacia la costa (playas, lajas, ...), puesto que el estudio se centra en la determinación de la marea meteorológica y el nivel medio del mar mensual, los cuales son independientes de dicho efecto.

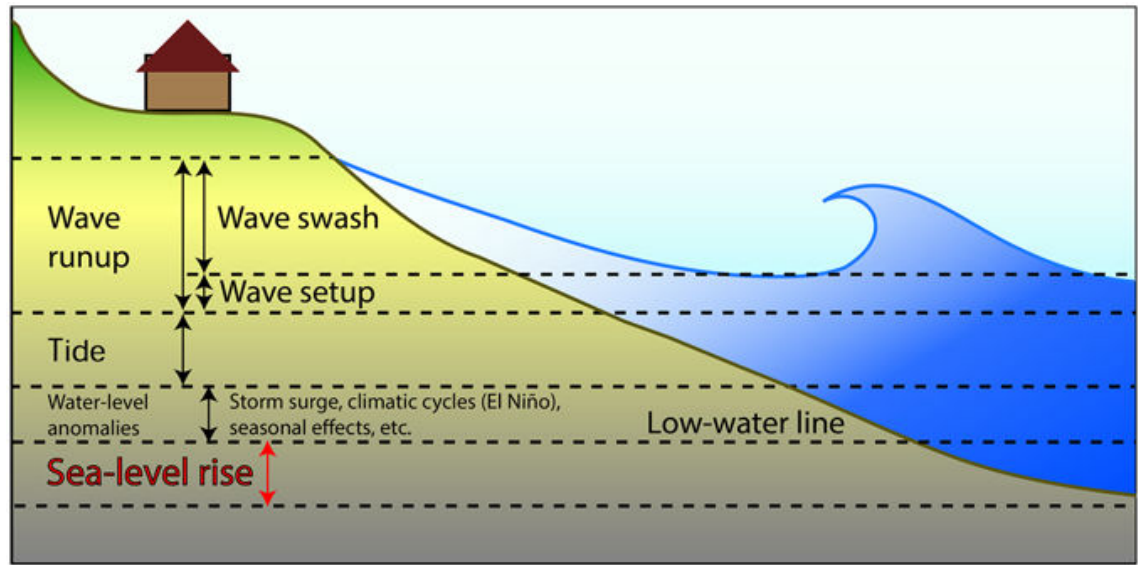


Figura 10: Composición del nivel del mar.

De todo lo descrito hasta ahora, queda en evidencia la vulnerabilidad de la costa frente a las variaciones del nivel del mar, generando importantes daños en infraestructuras e incluso pérdidas humanas. Por ello, es necesario medir y cuantificar el nivel del mar de modo que se pueda hacer frente a futuros daños.

Los mareógrafos son los aparatos que miden el nivel del mar total con respecto a un punto de referencia. Éstos son capaces de captar la componente astronómica, meteorológica, estérica (variaciones a causa de la densidad) y cambios de volumen por el derretimiento de glaciares y polos.

Sin embargo, la capacidad de registro de datos de los mareógrafos es bastante limitada, ya que pueden quedar fuera de servicio durante eventos extremos por rotura. No solo eso, es necesario realizar una parada operativa para el mantenimiento de los mismos, por lo que el registro de datos no será continuo.

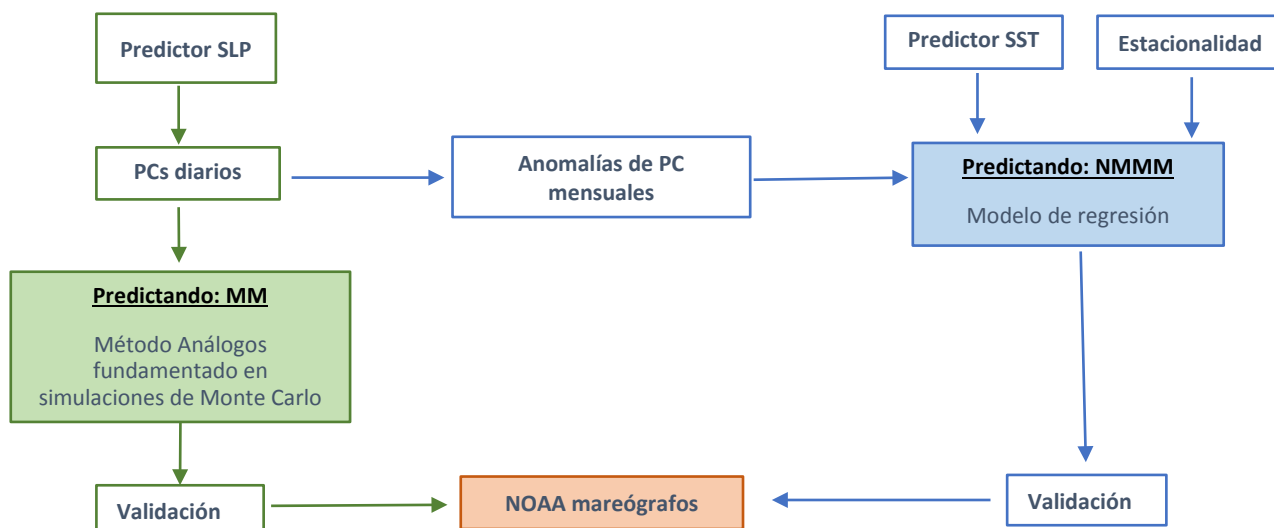
Así pues, haciendo uso de las series temporales de presión atmosférica y temperatura de la superficie del mar que datan de mucho antes que la instalación de mareógrafos y técnicas estadísticas, se pretende modelar las series temporales de marea meteorológica y nivel medio del mar mensual. De esta manera, se podrán rellenar los registros y conseguir series de mayor escala temporal.

3.2 Esquema general

La metodología implementada para obtener el modelado de las series de marea meteorológica (MM) y nivel medio del mar mensual (NMMM) puede ser dividida en dos diferentes rutas.

No obstante, el esquema interno empleado para la caracterización de ambas series es la misma. En primer lugar, se definen los predictores. Después, se desarrolla el modelo estadístico que da como solución el predictando. Aunque las técnicas estadísticas empleadas para la reconstrucción de las series no sean iguales, cabe destacar que en ambos modelos se hace uso de presiones atmosféricas que han sido extraídos de la misma base de datos. Finalmente, los resultados obtenidos son validados a partir de la base de datos de mareógrafos de NOAA.

En el diagrama adjunto se representan dichas líneas de ejecución y los pasos seguidos para su resolución:



A pesar de que todo el procedimiento completo haya sido implementado en cada uno de los 23 mareógrafos de la Costa Oeste de los Estados Unidos, solamente se van a mostrar los resultados obtenidos en San Diego (California), San Francisco (California) y Neah Bay

(Washington); ya que por su posición geográfica son capaces de representar los resultados de toda la costa.

3.2.1 Marea meteorológica (MM)

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la marea meteorológica es función de la presión atmosférica y del viento. Para su modelización, se ha empleado el método Análogos junto con simulaciones de Monte Carlo.

Como la magnitud de la MM es muy pequeña, y más a medida que nos acercamos hacia el sur de la costa oeste, es muy difícil proporcionar a la MM un único valor diario. Por ello, se ha considerado oportuno asignarle un rango probabilístico; delimitado por el valor del percentil 95, la media y el percentil 5. Así pues, el proceso consiste en asignar a cada día su rango de valores de MM en base a la similitud entre el predictor del día a reconstruir y el predictor del periodo de tiempo en el que se dispone de valores de MM. A continuación, en esta sección se explicará con mayor detalle el proceso y pautas seguidas.

En primer lugar, hace falta caracterizar los predictores. En este caso, la MM se ha predicho a través de datos de presión y gradientes de presión obtenidos de la base de datos del CFSR. Para ello, se ha hecho uso de una malla de 400x400 km centrado en cada mareógrafo, teniendo una resolución de 0, 5º. De esta manera, se han grabado 9x9 puntos de datos diarios desde 1979 hasta 2010 para cada estación.

Con el fin de reducir y comprimir la dimensión de datos extraídos, se ha empleado el método estadístico conocido como "Análisis de las Componentes Principales". Éste es una técnica que consiste en escoger un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto de datos original según una transformación lineal, de tal forma que la varianza de mayor tamaño del conjunto de datos es capturada en el primer eje (llamado el Primer Componente Principal), la segunda varianza más grande es el segundo eje, y así sucesivamente. Estos componentes de bajo orden a veces contienen el aspecto "más importante" de la información, y los demás componentes se pueden ignorar.

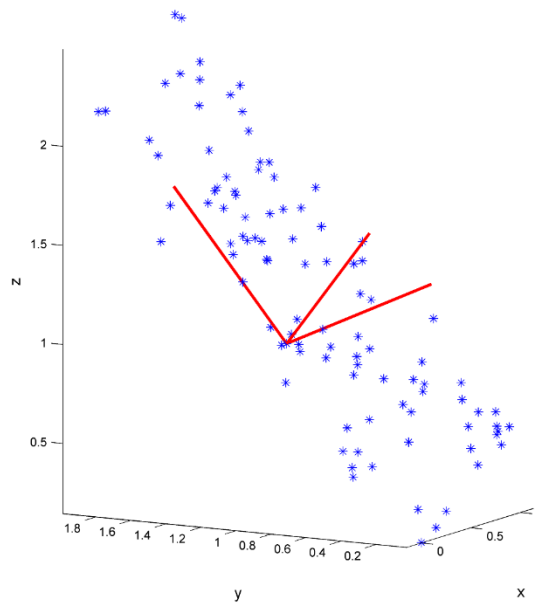


Figura 11: Proyección de datos en nuevos ejes coordenados.

Para construir esta transformación lineal debe construirse primero la matriz de covarianza o matriz de coeficientes de correlación. Debido a la simetría de esta matriz existe una base completa de vectores propios (autovectores) de la misma.

$\hat{S} = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{xy} & S_{yy} \end{pmatrix}$ matriz de covarianza, siendo S_{xx} y S_{yy} varianzas y S_{xy} covarianza

$$\hat{S}_{xx} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}; \quad \hat{S}_{yy} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}; \quad \hat{S}_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{n-1};$$

La transformación que lleva de las antiguas coordenadas a las coordenadas de la nueva base es precisamente la transformación lineal necesaria para reducir la dimensionalidad de datos. Además, los nuevos vectores se orientarán de tal manera que la suma de los cuadrados de las proyecciones de los datos sobre estos nuevos vectores sea máxima.

$$\hat{S} x f_i = \lambda_i x f_i$$

Siendo λ_i la varianza sobre la muestra del vector f_i (**autovalores**) y f_i las funciones empíricas ortogonales EOF (**autovectores**).

Los nuevos datos proyectados se obtendrán con la siguiente ecuación:

$$\underbrace{\bar{x}_k}_{PC_k(t)} = \underbrace{\begin{pmatrix} \bar{x}_{1k} \\ \vdots \\ \bar{x}_{dk} \end{pmatrix}}_{PC_k(t)} = F^T x_k = \underbrace{\begin{pmatrix} f_{11} & \cdots & f_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ f_{d1} & \cdots & f_{dn} \end{pmatrix}}_{EOF_k(s)} \begin{pmatrix} x_{1k} \\ \vdots \\ x_{nk} \end{pmatrix}$$

Así pues, volviendo a la reconstrucción de la MM, se ha realizado el análisis de las componentes principales con los valores de presión atmosférica y gradientes de presión atmosférica al cuadrado registrados por la malla de 400x400 km. Cabe destacar que antes de realizar dicho análisis estadístico se han extraído de la malla los datos que se sitúan tierra adentro. Por lo tanto, de la matriz de 9x9 desde 1979 hasta 2010 se han reducido los valores de presión considerablemente, bien no considerando la presión atmosférica en tierra y bien mediante el método de las componentes principales, en la que se han escogido los datos que representan un 98% de la varianza. Hay que tener en cuenta que el 98% de varianza en cada localización no se logra con el mismo número de modos.

La razón por la que se han escogido como parámetros la presión y gradientes de presión al cuadrado es su relación con la MM. El primero es causante directo de la sobreelevación del nivel del mar, tal y como se ha explicado en la sección 3.1. Por lo que respecta a los gradientes de presión al cuadrado, los gradientes de presión generan vientos, y el rozamiento tangencial del viento es proporcional a la velocidad del viento al cuadrado. En la ecuación que se ha mostrado anteriormente en el apartado de conceptos generales 3.1, se ha enseñado la relación de las fuerzas tangenciales y la sobreelevación del nivel del mar.

$$A = \frac{n \tau_{xz}(\eta) l}{\rho g h_0^2}$$

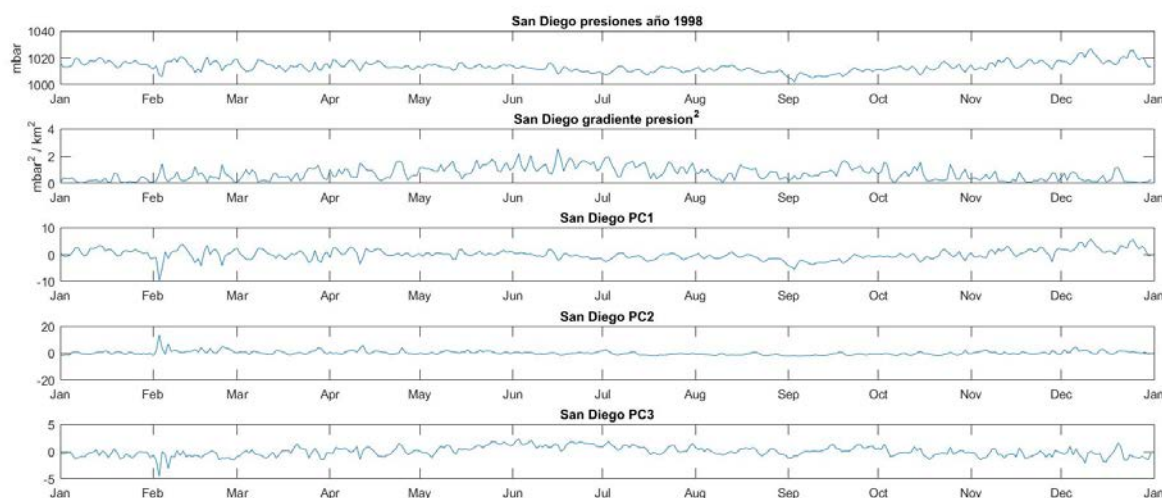


Figura 12: Representación de las presiones y gradientes de presión al cuadrado junto con las componentes principales. Se observa que la PC1 se corresponde con la forma de las presiones y la PC2 con los gradientes de presión al cuadrado.

Después de haber calculado las PC diarias, se han modificado los datos de nivel del mar registrados por los mareógrafos de la red de NOAA, con el fin de modelizar la marea meteorológica de los mismos. Para ello, se ha seguido el proceso que se enumera a continuación:

1. Obtención de datos horarios del nivel del mar de mareógrafos a partir de la base de NOAA. Figura (13-a).
2. Substracción de la marea astronómica al nivel total. La marea astronómica se refleja en la figura (13-b), mientras que la resta en la (13-c).
3. Cálculo de la subida del nivel del mar mediante regresión lineal, representado por una línea roja en la figura (14).
4. Substracción de la subida del nivel del mar a la serie del punto dos.
5. Una vez la subida del nivel del mar ha sido extraída de la serie, se ha percibido que aún una leve onda permanece en la serie. Por ello, con el fin de eliminarlo, se ha calculado una media móvil de tres en tres años, y consecuentemente, substraída a la misma. En la figura (15) se representa dicha onda en rojo.

6. El último elemento que se ha descontado de la serie registrada en el paso 5 ha sido el nivel medio del mar mensual, figura (16), de forma que se obtiene la marea meteorológica horaria, figura (17).
7. Finalmente, se ha extraído el valor de la máxima marea meteorológica diaria.

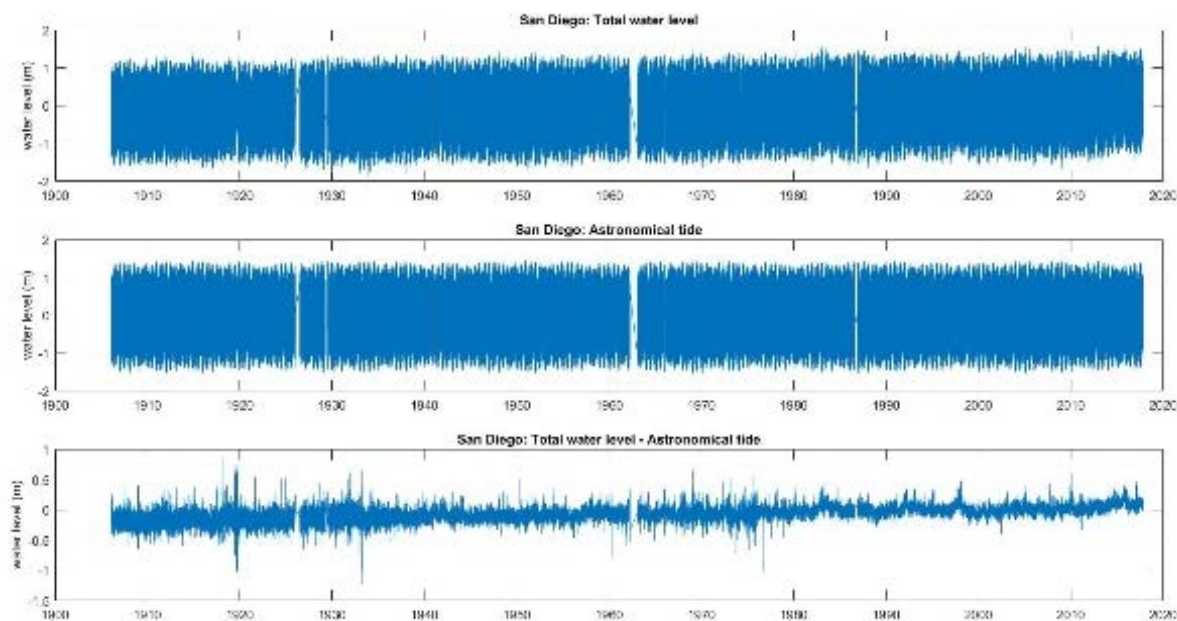


Figura 13: Nivel del mar total, marea astronómica y el resultado de su resta.

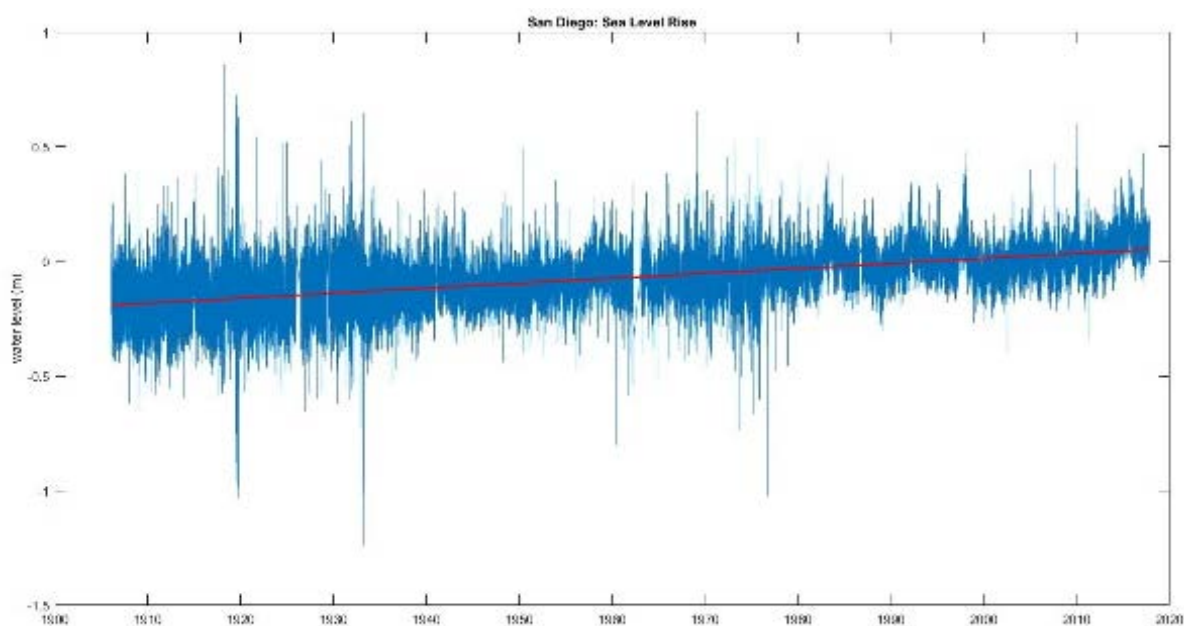


Figura 14: Regresión lineal de la subida del nivel del mar.

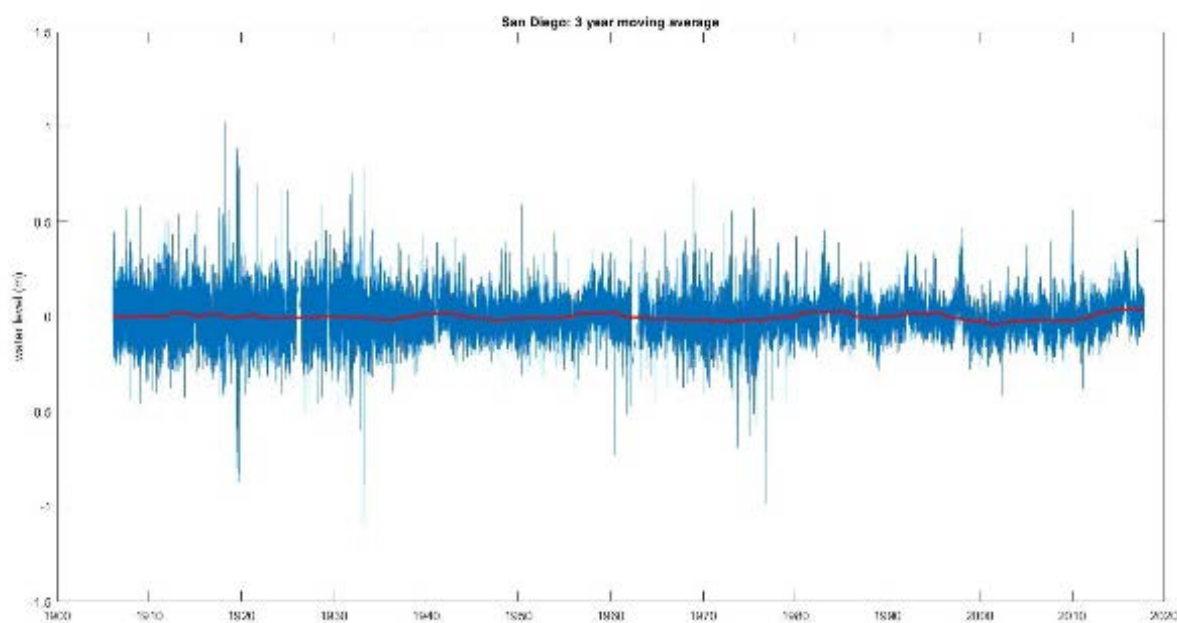


Figura 15: Onda débil residual calculada a partir de una media móvil de 3 años.

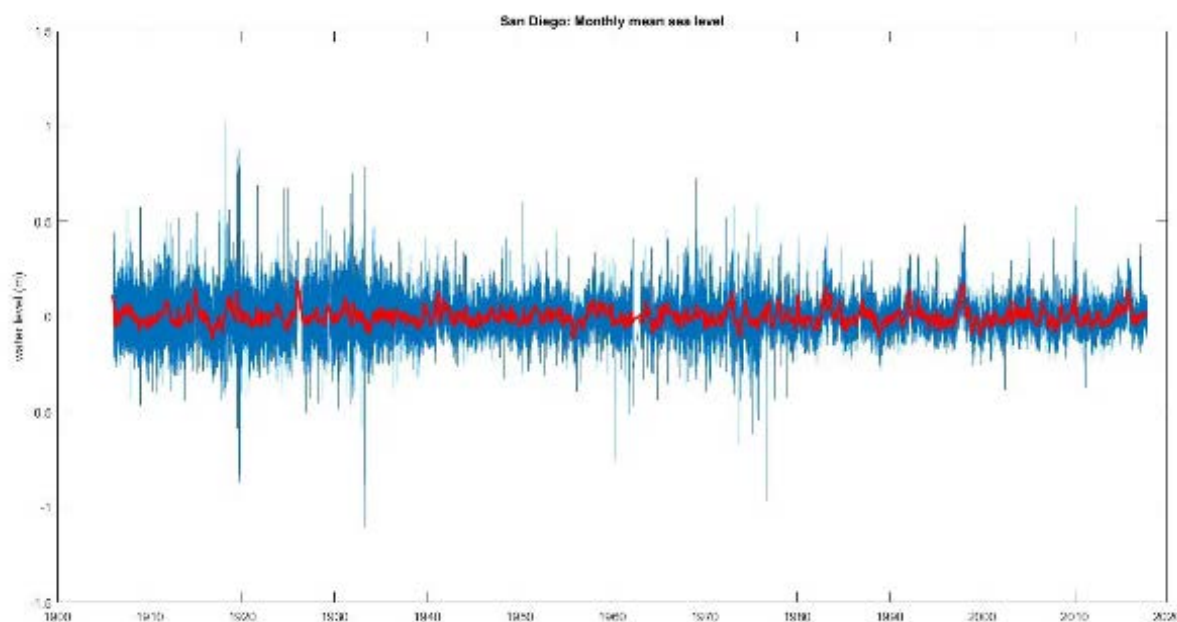


Figura 16: Nivel medio del mar mensual (en rojo)

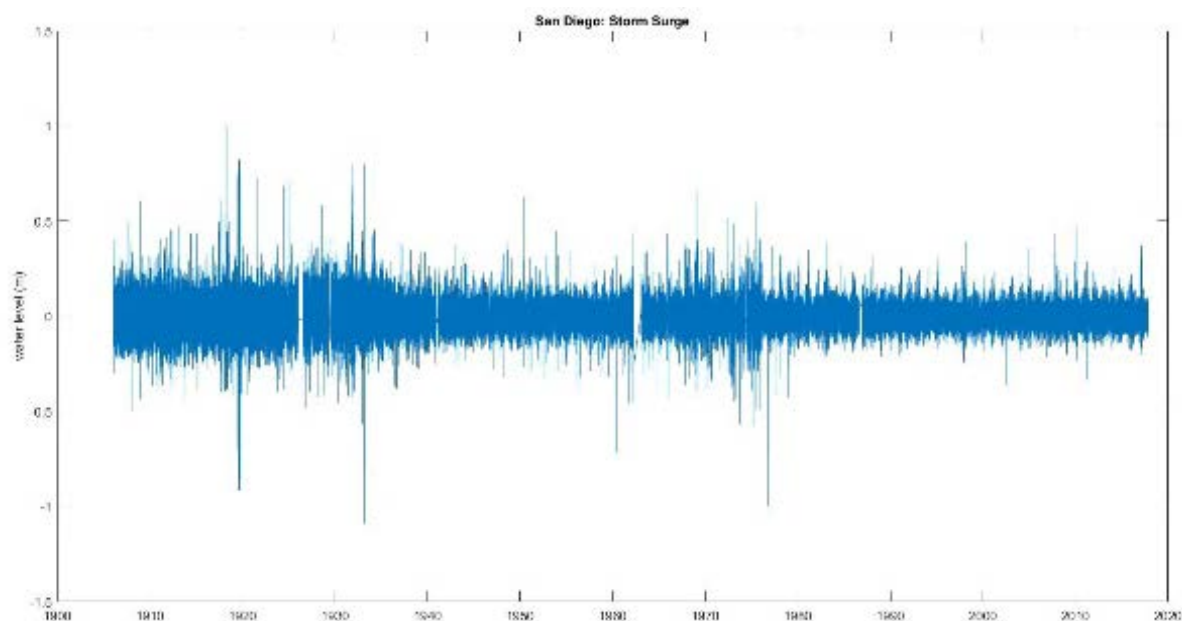


Figura 17: Marea meteorológica horaria.

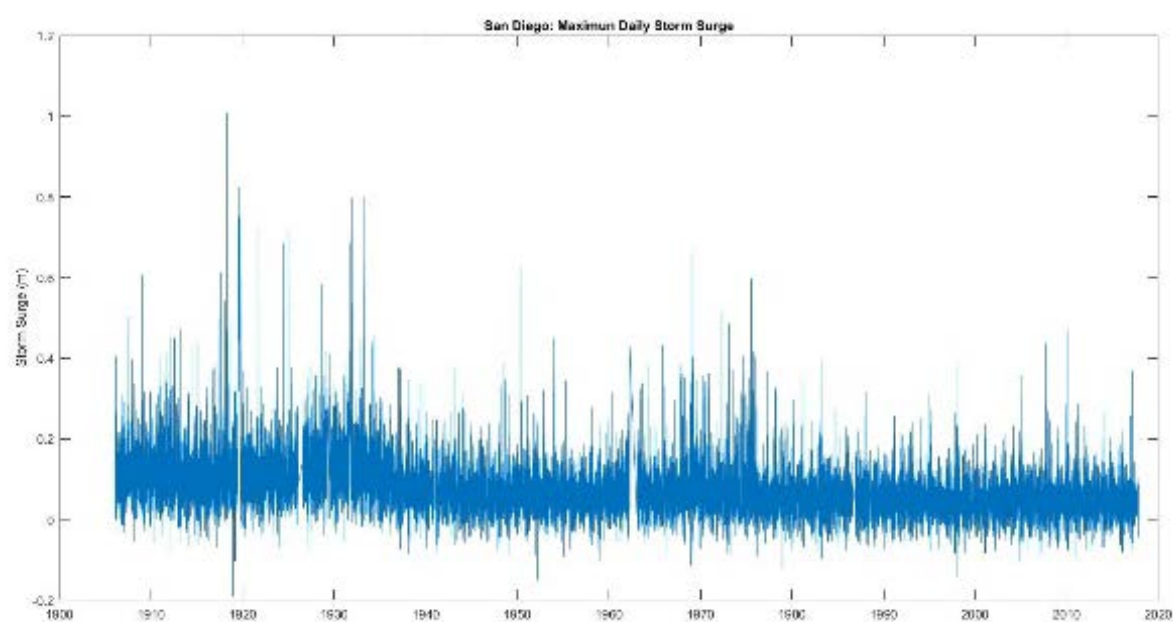


Figura 18: Máxima marea meteorológica diaria.

Una vez se han calculado las PC diarias y valores reales de la marea meteorológica gracias a los datos registrados por los mareógrafos de NOAA, se ha tenido que intersectar su espacio temporal, es decir, cada día tendrá asignado un valor de MM y de presión. Cabe destacar que la escala temporal de presiones del CFSR no tiene ningún vacío, por lo que los saltos que

aparezcan en la serie reconstruida de MM serán las debidas a falta de datos en el mareógrafo. A lo largo de la redacción a esta serie temporal que contiene datos de marea meteorológica procedentes de los mareógrafos, así como las componentes principales de presión para cada día, se referenciará como “escala temporal disponible”.

Así pues, ya se tienen preparados los datos de partida necesarios para comenzar a modelar la marea meteorológica. Para ello, tal y como se ha mencionado anteriormente, se ha empleado el Método de Análogos. Éste consiste en asignar al día a reconstruir el valor de la marea meteorológica de la escala temporal disponible en función de la similitud del valor de la presión entre el día a reconstruir y todos los datos de presión de dicha serie temporal disponible.

Con el fin de garantizar que los datos de entrenamiento y prueba sean independientes entre sí, se ha empleado la técnica estadística de validación cruzada. Ésta se emplea en modelos cuyo objetivo principal es la predicción, para así poder estimar la precisión de dicho modelo.

En consecuencia, se ha discretizado la escala temporal disponible en diez subgrupos, cada uno con el mismo número de datos, de tal manera que se han generado diez casos de estudio independientes. De este modo, cada caso a analizar estará compuesto por nueve subgrupos que formarán el grupo de calibración, gracias a los cuales habrá que reconstruir el décimo conjunto (representado en rojo en la imagen adjunta).

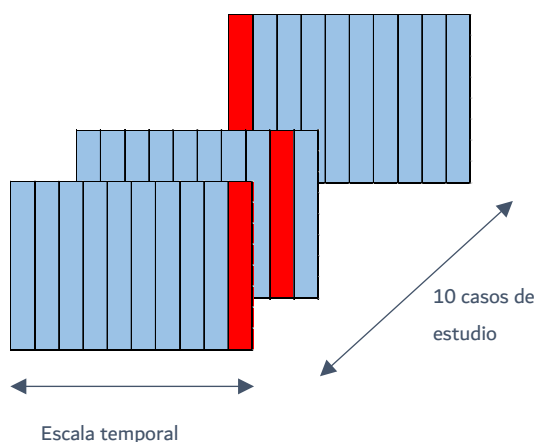


Figura 19: Representación de los diez casos de estudio. La franja roja es el conjunto de datos a reconstruir.

La dimensión de datos de cada subgrupo dependerá del número de años que lleva en funcionamiento cada mareógrafo. Por ejemplo, en San Francisco cada subgrupo tendrá en torno a 13.850 días, más o menos lo equivalente a 38 años por subconjunto, mientras que en Cape Disappointment como solamente se disponen de 3 años de registros en su mareógrafo, cada subconjunto estará formado por 110 días. Cabe no olvidar que a cada día de cada subgrupo le corresponde un valor de MM y presión.

Volviendo a la metodología empleada, una vez han sido identificados los casos de estudio, en todos ellos se ha procedido de la misma manera. En primer lugar, para cada día del subgrupo de reconstrucción se ha calculado la Distancia Euclídea a todos los datos pertenecientes al grupo de calibración en función de los valores de presión. Tal y como muestra la figura (20) adjunta, el número de dimensiones de las componentes principales de presión es función de los modos necesarios para explicar el 98% de la varianza.

De todos los puntos de calibración, solamente han sido registrados los diez valores más próximos ($K=10$) para cada día a reconstruir. Subsecuentemente, se ha calculado el peso de esos diez próximos predictores mediante la siguiente fórmula:

$$w_i = \frac{\left(1 - \left(\frac{d_i}{d_k}\right)^2\right)^2}{\sum_{i=1}^k \left(1 - \left(\frac{d_i}{d_k}\right)^2\right)^2}$$

siendo d_i la distancia euclídea al punto de estudio en cuestión ($i=1-10$), y d_k la distancia euclídea al décimo valor más próximo.

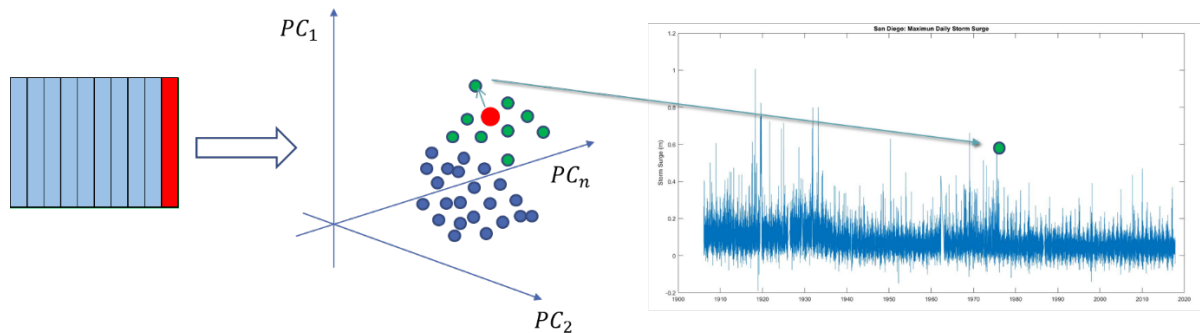


Figura 20: El punto rojo representa el día a reconstruir, los verdes sus diez puntos más próximos. A cada punto PC de presión le corresponde una marea meteorológica del mareógrafo, acorde con su fecha. La dimensión n dependerá del número de PC que explican el 98% de la varianza.

A continuación, se ha empleado la simulación de Monte Carlo para comparar los pesos y así poder predecir el valor de la MM mediante rangos de probabilidad. Así pues, para cada día a reconstruir se han simulado 1000 iteraciones de Monte Carlo con valores entre 0-1. Dependiendo del número aleatorio generado por Monte Carlo, la MM asignada a cada día será:

1. Si el número aleatorio $\geq w_1$ la MM asignada es la del predictor más cercano.
2. Si el número aleatorio $\leq w_{10}$, la MM asignada es la del décimo predictor más cercano.
3. Si $w_1 \leq \text{número aleatorio} \leq w_{10}$, la MM asignada es la del peso más cercano.

De esta manera, se disponen de 1000 valores de MM para cada día a reconstruir. Como es difícil de cuantificar la magnitud exacta de la marea meteorológica por ser de escasos milímetros en el sur de la costa oeste de los Estados Unidos, se ha decidido representar el resultado de MM máximo diario con los percentiles del 5, 50 y 95%. De esta manera, cada día reconstruido quedará definido a partir de estos tres percentiles.

3.2.2 Nivel medio del mar mensual (NMMM)

Las componentes que contribuyen al nivel medio del mar mensual son la marea astronómica, meteorológica y alteraciones no periódicas como las fluctuaciones climáticas o cambios de volumen de agua a causa de variaciones en la densidad, esto es, componentes de segundo orden. Así pues, de forma global se puede destacar que el NMMM está formado por todas las componentes descritas en la sección (3.1.4) excepto la subida del nivel del mar, que es atribuido al cambio climático.

En diferencia a la marea meteorológica, se ha empleado un modelo de regresión para predecir el NMMM, de tal forma que se caracteriza el resultado por un único valor. Las variables que toman parte en dicho modelo son las anomalías mensuales de temperatura superficial de agua del mar y anomalías mensuales de presión. Con el objetivo de no sobreparametrizar la regresión, se ha empleado el método de validación cruzada para garantizar su eficacia.

En referencia al proceso seguido en la modelización, al igual que con la marea meteorológica en primer lugar se deben de caracterizar los predictores. Para el NMMM se han escogido dos, las anomalías mensuales de temperatura superficial del agua del mar y anomalías mensuales de presión.

En cuanto a las anomalías mensuales de presión, se han obtenido a partir de las componentes principales diarias de presión y gradiente de presión al cuadrado empleadas para caracterizar la marea meteorológica. En consecuencia, la malla original consiste en una cuadrada de 400x400 km centrado en cada mareógrafo, teniendo una resolución de 0.5º y una extensión de datos desde enero de 1979 hasta diciembre de 2010. De todos los datos registrados, se reduce su dimensión excluyendo los nodos que quedan tierra adentro y aplicando el método de las componentes principales previamente explicado. El número de componentes principales escogidos también ha sido aquellos que explican hasta el 98% de la varianza.

A continuación, se ha calculado la media mensual de las PCs de presión diarias. Para calcular las anomalías, hace falta restarle a cada media mensual previamente obtenida la estacionalidad mensual correspondiente, es decir, al valor de la PC de enero de 1983 se le restará la media de todos los meses de enero que conforman la base de datos disponible.

En las figuras adjuntas se representa el desarrollo descrito para las presiones expresadas como las componentes principales del modo 1 (PC1) de San Diego, siendo la PC1 la más representativa del conjunto de datos. En la figura (21) se simboliza la media mensual de la PC1 en rojo, en la figura (22) su estacionalidad y en la (23) el resultado de restar ambas series.

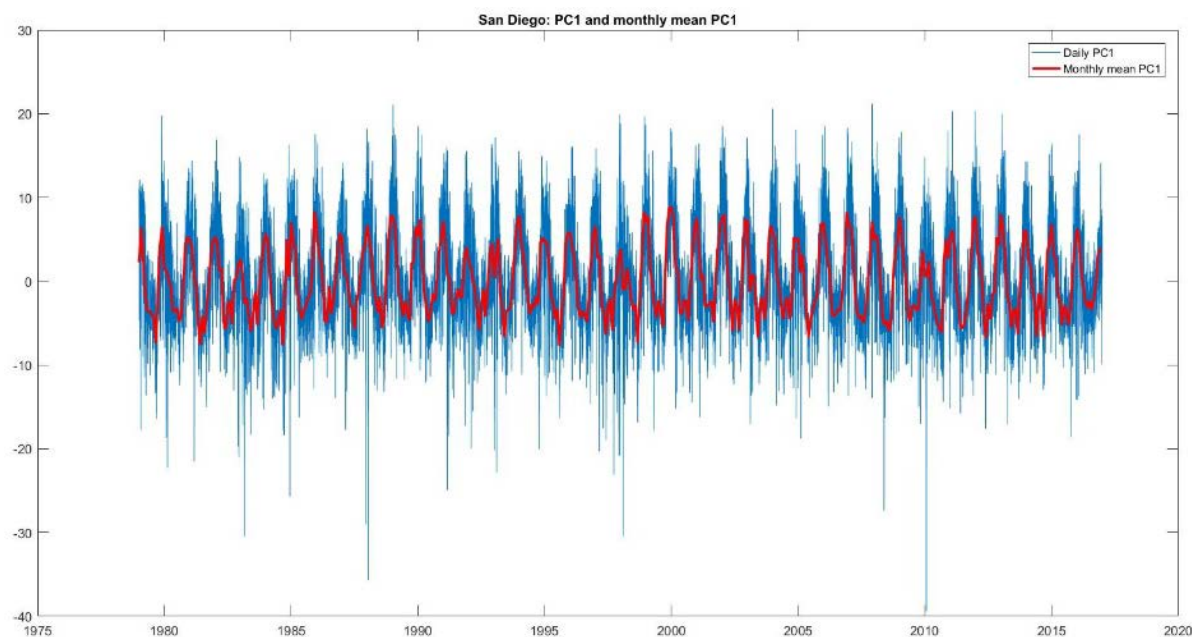


Figura 21: Representación de la PC1 de presión en azul, y en rojo la media mensual de la misma.

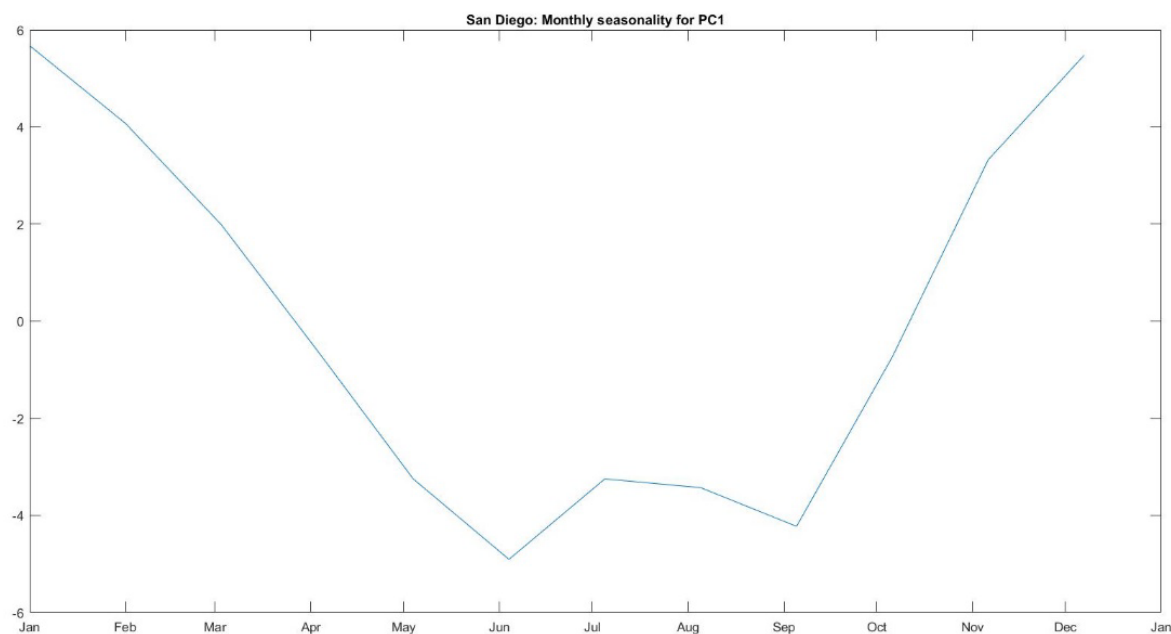


Figura 22: Estacionalidad de la PC1 en San Diego.

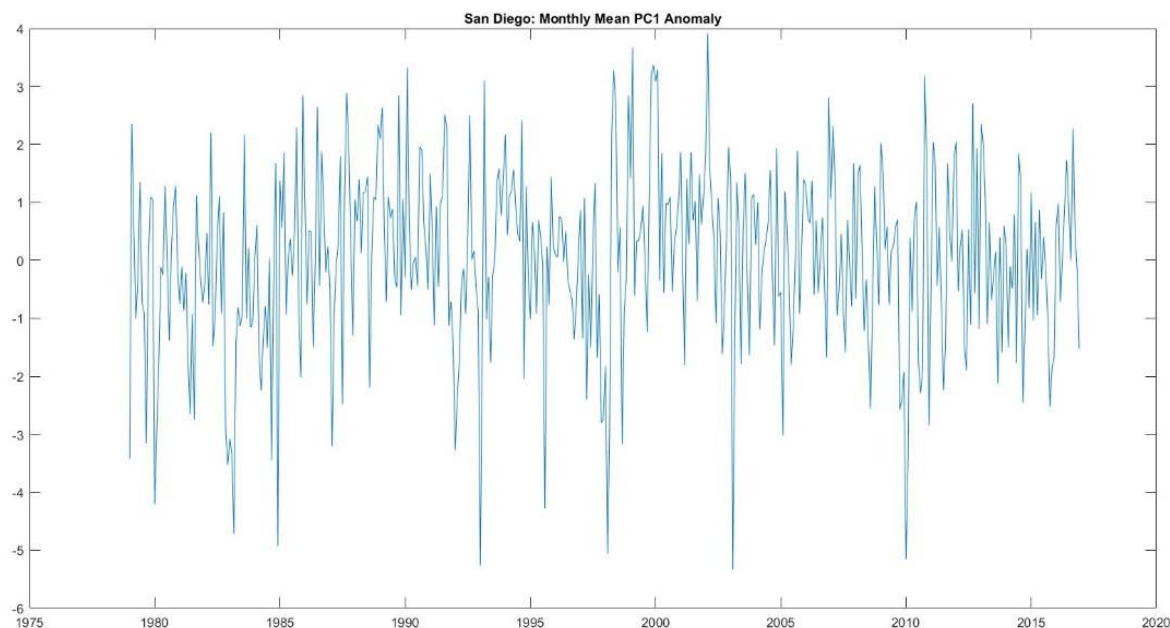


Figura 23: Resultado de la anomalía de presión mensual de la PC1 en San Diego.

En relación a las anomalías mensuales de temperatura superficial de agua del mar (SSTa), se ha procedido de igual manera que en el artículo *Time-varying Emulator for Short and Long-Term Analysis of Coastal Flooding* (D. Anderson et al.). A través del artículo se pueden simular las variaciones térmicas a lo largo de toda la Costa Oeste de los Estados Unidos a partir de los patrones de temperatura registrados solamente en una franja del Ecuador del Océano Pacífico.

En primer lugar, se han extraído de la base de datos de Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) v4 con una malla que se extiende desde 120° E hasta 280° E y desde 5° N hasta 5° S los valores de SSTa. Dichas anomalías han sido calculadas a través de una media móvil que abarca los meses de 11 años anteriores y posteriores a la fecha, esto es, la anomalía de mayo de 1900 se calcula restando al valor de la temperatura superficial de agua del mar correspondiente a ese mes, la media de todos los mayo desde 1889 hasta 1911.

Una vez han sido registrados los datos de la malla, se ha promediado latitudinalmente cada longitud, considerando escalas temporales anuales. De este modo, se han podido representar los datos a través de diagramas tipo Hovmoller, en los cuales se representa en el eje

x la longitud, en el eje y el tiempo y mediante distintas gamas de colores en función de su magnitud, el parámetro escalar a representar tal y como se muestra en la figura (24).

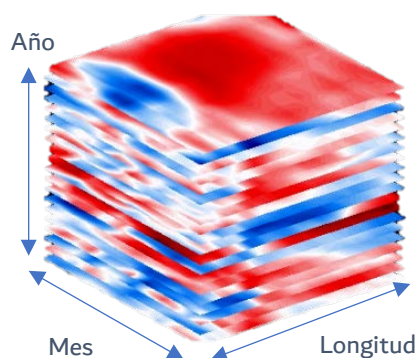


Figura 24: Diagrama de Hovmoller

De la misma manera que se ha reducido la dimensión de datos en todos los predictores gracias al método estadístico de las componentes principales, en este caso también se ha implementado para identificar cuáles son los modos espaciales predominantes. De todos ellos, únicamente se hará uso de las tres primeras componentes en el modelo de regresión, los cuales explican el 67% de la varianza.

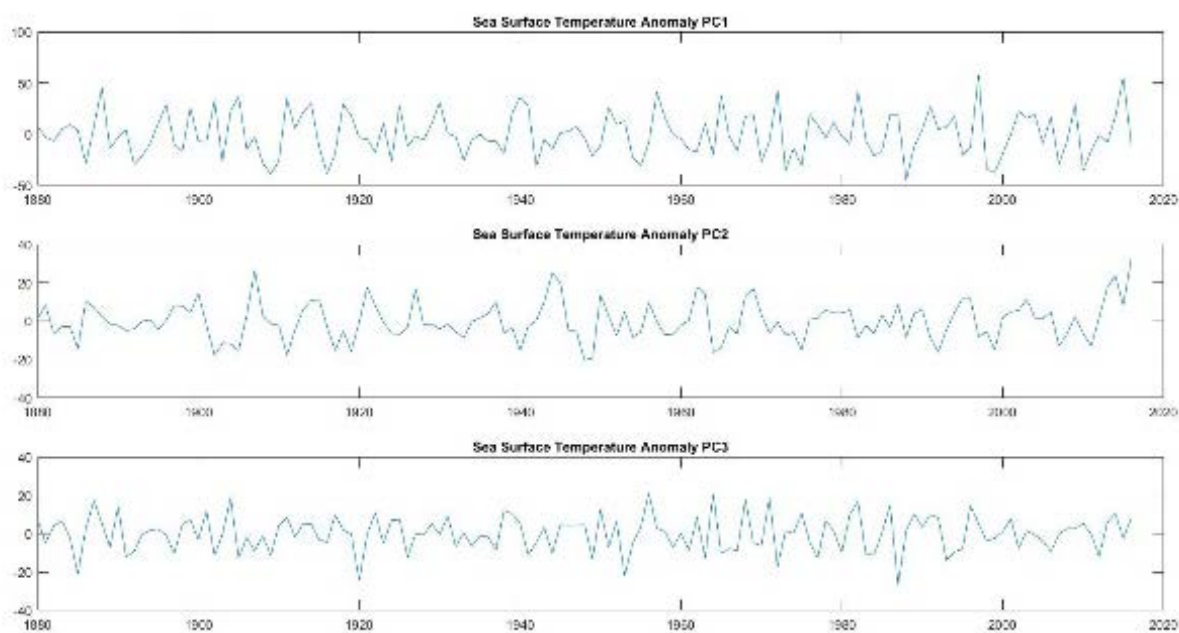


Figura 25: Representación de las tres PCs de las anomalías mensuales de temperatura de la superficie de agua de mar.

Con los predictandos calculados, el siguiente paso para poder aplicar el modelo de regresión consiste en obtener los valores del NMMM a partir de los datos registrados en los mareógrafos. Tal y como se ha mencionado anteriormente, el registro de datos de esos mareógrafos ha sido extraído de la base de datos de la NOAA obteniéndose para cada uno de los aparatos, el nivel de mar total horario.

Así, el nivel del mar total medido por los mareógrafos está constituido por la contribución de tres componentes: la marea astronómica, la marea meteorológica y la subida del nivel del mar. Sin embargo, para el estudio del NMMM no se ha tenido en cuenta el efecto de la subida del mar, ya que dicho NMMM depende exclusivamente de la marea astronómica y la marea meteorológica. Por tanto, puesto que los registros obtenidos de la base de datos de la NOAA llevan incluida la subida del nivel del mar en sus valores, en primera instancia se deberá realizar una serie de correcciones a esas mediciones a fin de adaptarlas y emplearlas en la caracterización del NMMM.

Por consiguiente, el procedimiento empleado para el estudio y obtención del NMMM ha consistido en los siguientes pasos:

1. Obtención del nivel del mar total horario de los registros de la NOAA.
2. Empleo de un modelo de regresión lineal simple para el cálculo de la componente derivada a la subida del nivel del mar incluida en la medida del nivel del mar total de los registros.
3. Sustracción de la subida del nivel del mar de los registros del nivel del mar total.
4. Una vez se ha eliminado la contribución de la subida del nivel del mar a los valores del nivel del mar total medidos por el mareógrafo, se observa que en los registros sigue apareciendo una onda residual débil. Para el análisis de esta onda, se calcula una media móvil de tres en tres años, que posteriormente será substraída del mismo modo que la subida del nivel del mar de los registros.
5. Finalmente, se determina el nivel medio del mar mensual

Las figuras que se muestran a continuación recogen los resultados obtenidos para cada una de las diferentes etapas del procedimiento detallado.

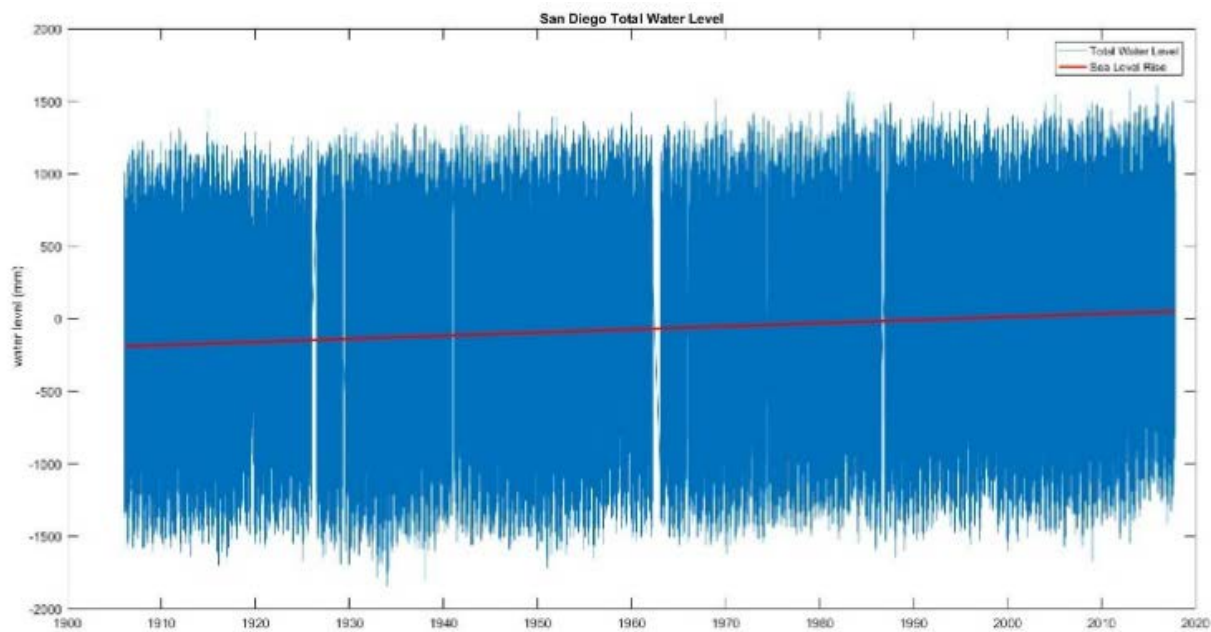


Figura 26: Nivel del mar total y la subida del nivel del mar en rojo).

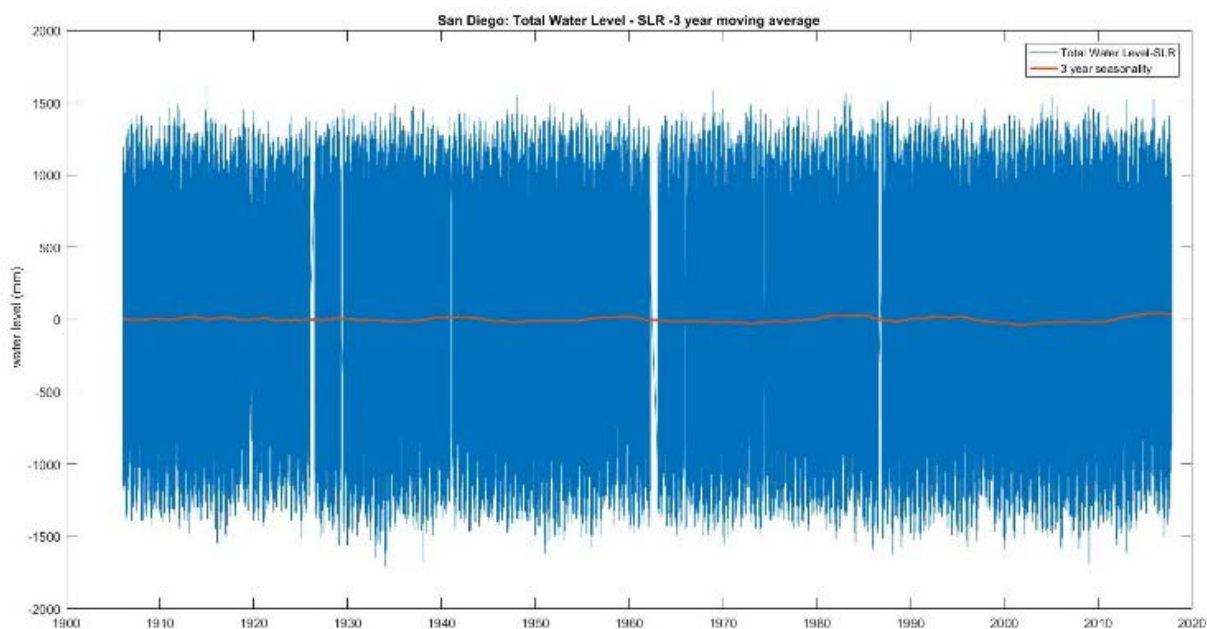


Figura 27: Onda residual obtenida con la media móvil trianual.

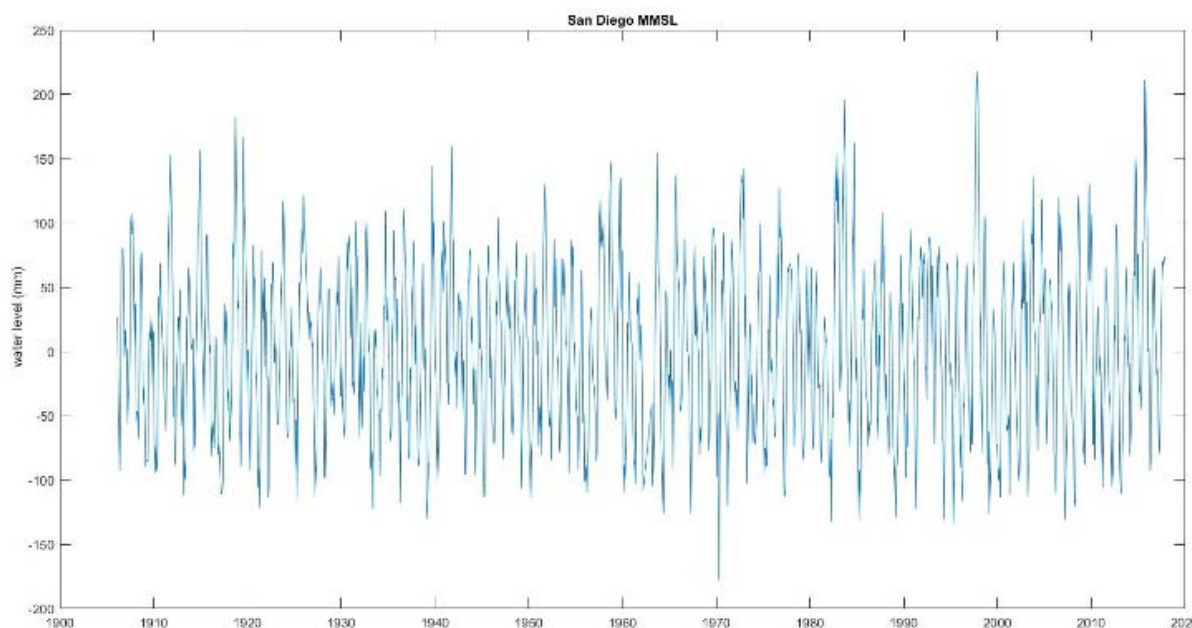


Figura 28: Resultado final del nivel medio mensual

Con los valores de las componentes principales de las presiones y la temperatura superficial del agua del mar, se procede a realizar la reconstrucción de los predictandos.

Cabe destacar que el periodo de tiempo de los predictandos y el mareógrafo no coinciden completamente, y que por tanto, el periodo de tiempo del que se dispone para realizar la calibración del NMMM será el periodo de tiempo común a ambos. Es decir, para la calibración solo se dispone de aquellos datos que se encuentran en el intervalo de tiempo en el que se tienen datos del mareógrafo y predictandos simultáneamente.

Asimismo, si se analiza la ecuación de regresión que ha sido empleada, se observa que dicha ecuación puede dividirse en dos grupos. Por un lado, los coeficientes de las componentes principales de las presiones (SLP) están correlacionados linealmente entre ellas, mientras que los términos asociados a las componentes principales de la temperatura superficial del agua del mar (SST) se ajustan a las variaciones estacionales, pudiéndose corresponder a ondas subarmónicas.

$$\begin{aligned}
 MMSL = & a_0 + a_1 PC1_{SSTa} + a_2 PC2_{SSTa} + a_3 PC3_{SSTa} + (a_4 + a_5 PC1_{SSTa} + \dots) \cos\left(\frac{2\pi t}{365}\right) \\
 & + (a_8 + a_9 PC1_{SSTa} + \dots) \sin\left(\frac{2\pi t}{365}\right) + (a_{12} + a_{13} PC1_{SSTa} + \dots) \cos\left(\frac{4\pi t}{365}\right) \\
 & + (a_{16} + a_{17} PC1_{SSTa} + \dots) \sin\left(\frac{4\pi t}{365}\right) + a_{20} \overline{PC1_{SLPa}} + a_{21} \overline{PC2_{SLPa}} + \dots
 \end{aligned}$$

Validación del modelo de regresión

El objeto de este apartado consiste en verificar que el modelo de regresión no está siendo sobreparametrizado. Para ello, se ha empleado un método de validación cruzada.

De esta manera, el periodo de tiempo disponible para el entrenamiento del modelo ha sido subdividido en un total de 10 subconjuntos. La división se ha realizado de forma que cada subconjunto cuente con la misma cantidad de datos. Una vez realizada la división, el modelo de regresión se ha simulado diez veces. En cada simulación se emplean nueve de los subconjuntos para reproducir el NMMM del subconjunto excluido. Finalmente, los resultados de la simulación son validados con el NMMM calculado a partir de los registros del mareógrafo.

La figura (29) muestra las gráficas de dispersión obtenidas en el método de validación cruzada del análisis llevado a cabo para la ciudad de San Diego. Dichas gráficas de dispersión corroboran que el modelo de regresión predice de forma precisa y correcta el NMMM de la zona.

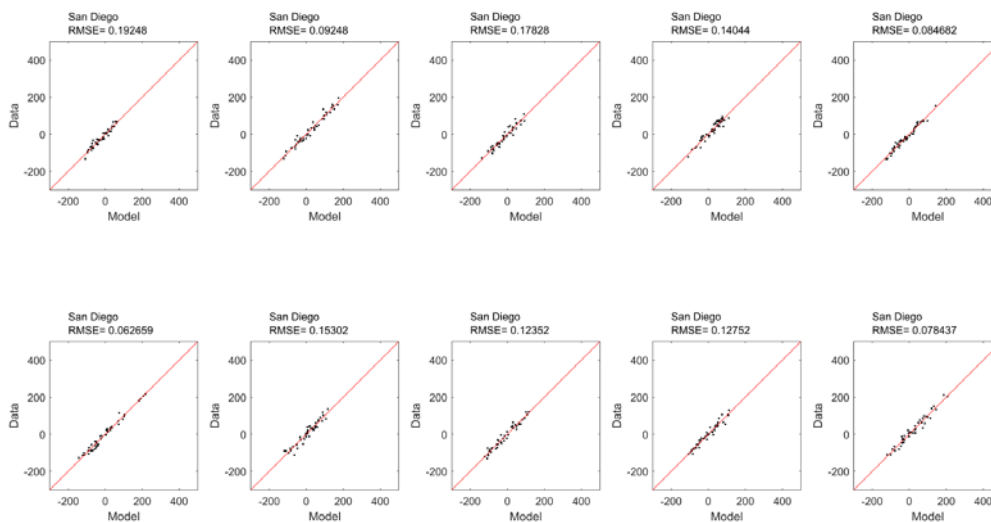


Figura 29: Resultado de aplicación del método de validación cruzada.

4. Resultados

En el siguiente apartado, se representan los resultados obtenidos tras la implantación de la metodología descrita en la sección 3. Tal y como se ha mencionado anteriormente, solamente se van a mostrar los resultados logrados en el sur de la costa oeste, San Diego, zona central, San Francisco, y la zona norte, Neah Bay; ya que se considera que representan en su totalidad la Costa Oeste de los Estados Unidos.

La validación se ha realizado a partir de los datos registrados en los mareógrafos a tiempo real a través de NOAA y los reconstruidos. Con el fin cuantificar la exactitud de la predicción, se han calculado la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), el índice de dispersión (SI) y el bias de los datos reales y reconstruidos.

$$RMSE = \frac{\sqrt{(y_{pred} - y_{real})^2}}{\max(y_{pred})}$$

$$Bias = \frac{\sum(y_{pred} - y_{real})}{n}$$

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{\sum(y_{pred} - y_{real})^2}{n}}}{\sum \frac{y_{real}}{n}}$$

siendo y_{pred} los datos reconstruidos, y_{real} los datos registrados por el mareógrafo, y n la longitud de número de datos reales o reconstruidos.

4.1 Marea meteorológica y validación

Del análisis se obtiene que el modelo de reconstrucción de marea meteorológica se ajusta mejor en la zona norte de la costa oeste, mientras que en el sur es bastante menos

preciso. En la parte inferior de la costa no es capaz de diferenciar entre las sobreelevaciones y reducciones del nivel del mar, esto es, parece que el modelo simplemente proporciona un resultado de MM medio a las fechas a reconstruir.

Este hecho es debido a que la magnitud de la marea meteorológica en el norte es mayor a causa de los fuertes vientos localizados que se generan, por lo que en el sur será muy difícil predecir variaciones de unos pocos milímetros.

La forma de la gráfica de dispersión también corrobora estas conclusiones, ya que ésta se va alargando a medida que se sube hacia San Francisco, de forma que los valores extremos predichos se asemejan mejor a los datos registrados por el mareógrafo.

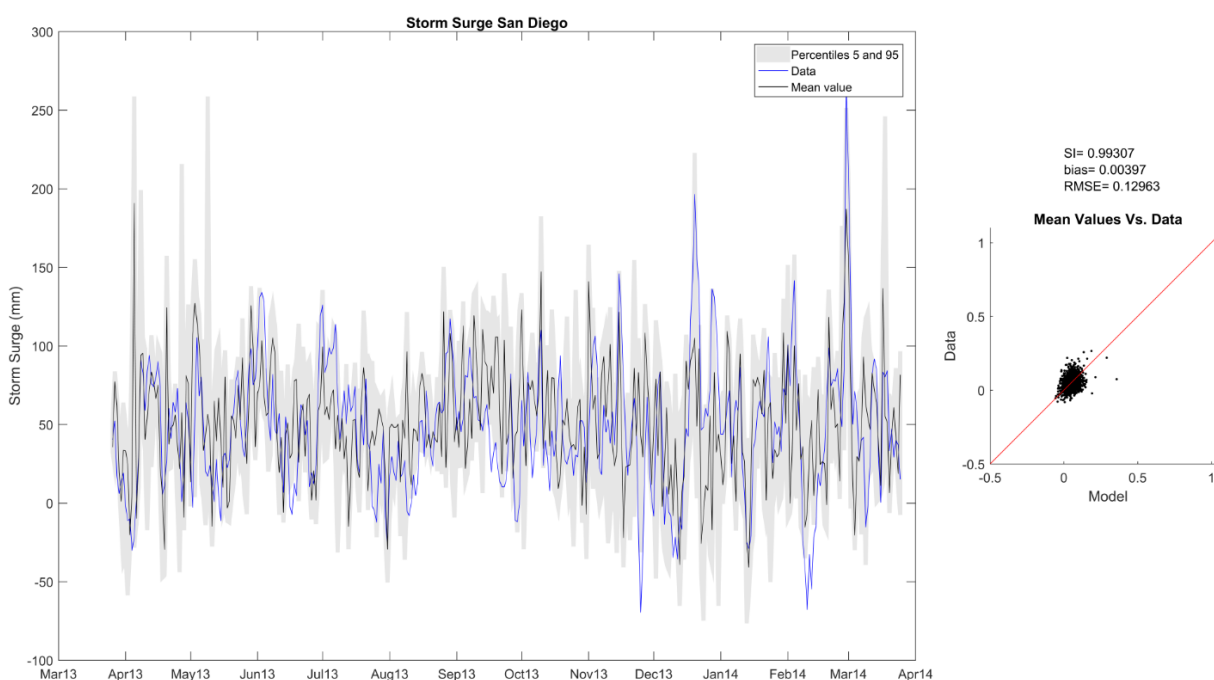


Figura 30: Marea meteorológica en San Diego.

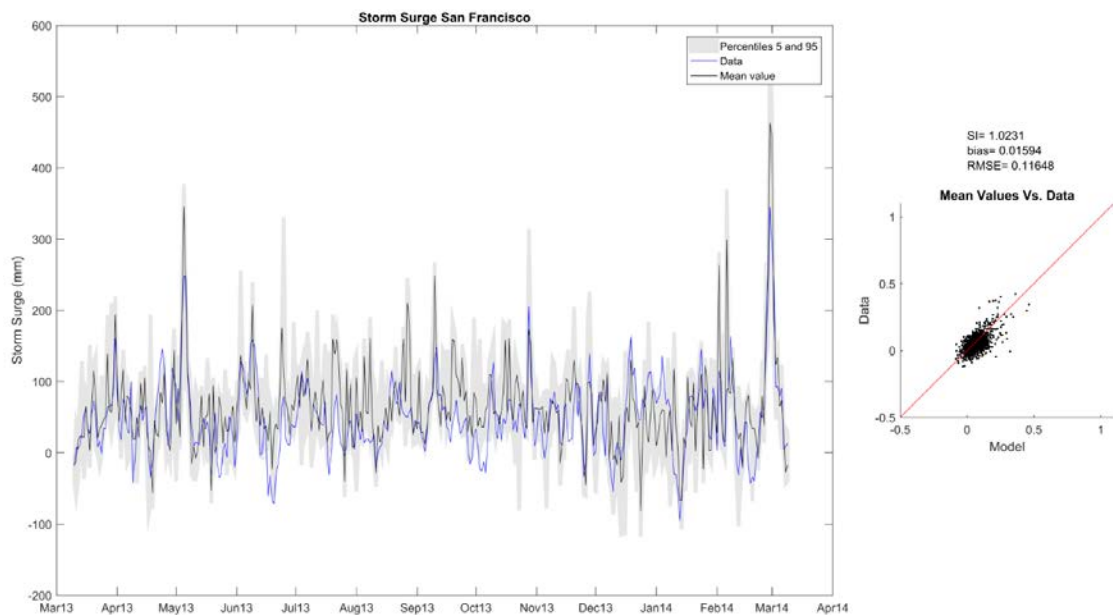


Figura 31: Marea meteorológica en San Francisco.

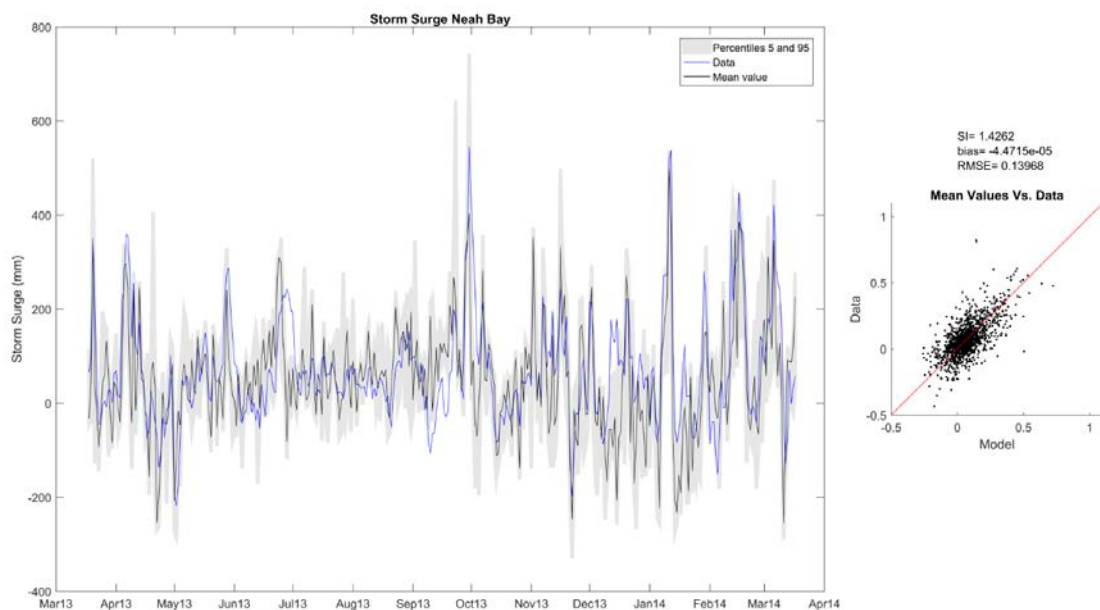


Figura 32: Marea meteorológica en Neah Bay.

4.2 Nivel medio del mar mensual y validación

Los resultados obtenidos en la modelización del nivel medio del mar mensual han sido favorables. Independientemente de su situación, los valores reconstruidos se asemejan

perfectamente a los registrados por el mareógrafo de NOAA. Incluso las sobreelevaciones y reducciones del nivel extremas son capaces de ajustarse correctamente, tal y como muestran las gráficas de dispersión.

Este hecho viene relacionado por la influencia de las fluctuaciones climáticas y presencia de vientos a lo largo de la costa oeste. De esta manera, como la zona baja de la costa se caracteriza por estar plenamente influenciada por variaciones de temperatura a causa de patrones climáticos dada su proximidad al Ecuador, la parte del modelo de regresión relacionado con las temperaturas tendrá un mayor efecto en el resultado; es decir, los coeficientes de la regresión asociados a la temperatura serán mayores que los relacionados con la presión.

Por lo contrario, en la zona alta de la costa disminuye la influencia de las fluctuaciones climáticas, por lo que los coeficientes asociados a las presiones afectarán más que los de la temperatura.

En conclusión, sea cual sea la localización del punto a estudiar, el modelo de regresión se ajusta perfectamente a los datos registrados por los mareógrafos, dando por satisfechas los resultados conseguidos en el análisis.

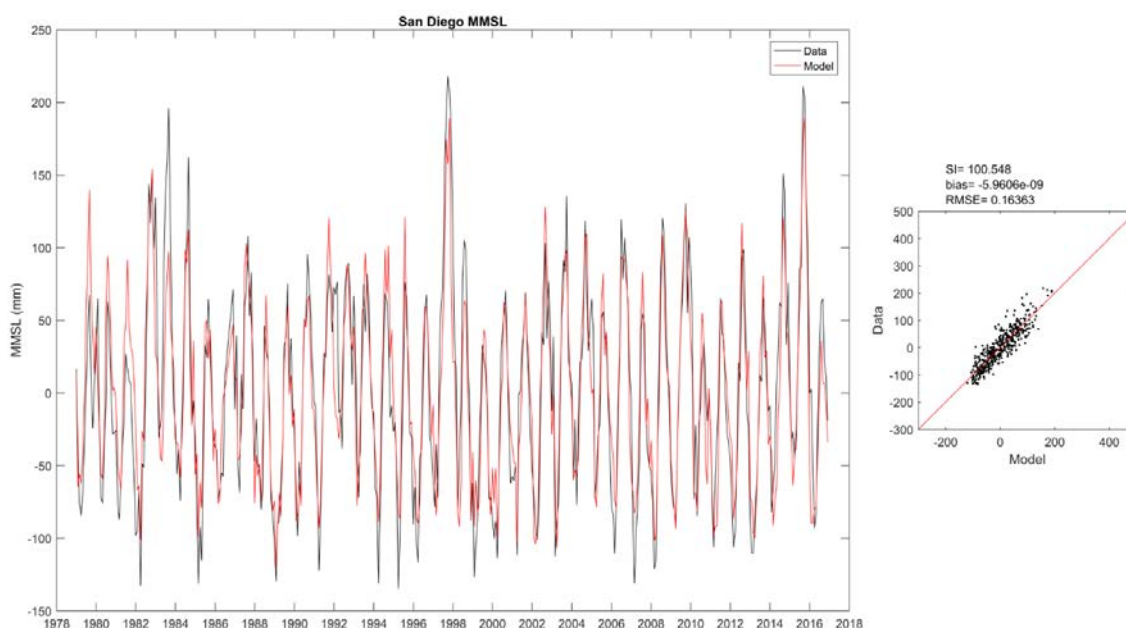


Figura 33: Nivel medio del mar mensual en San Diego.

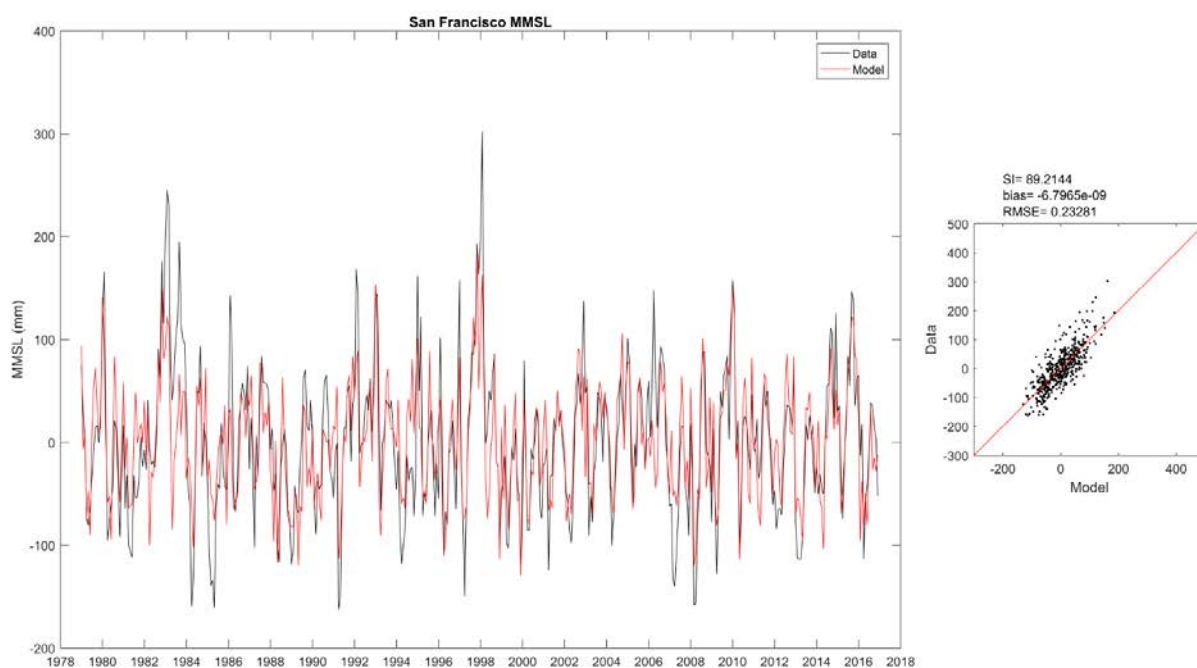


Figura 34: Nivel medio del mar mensual en San Francisco.

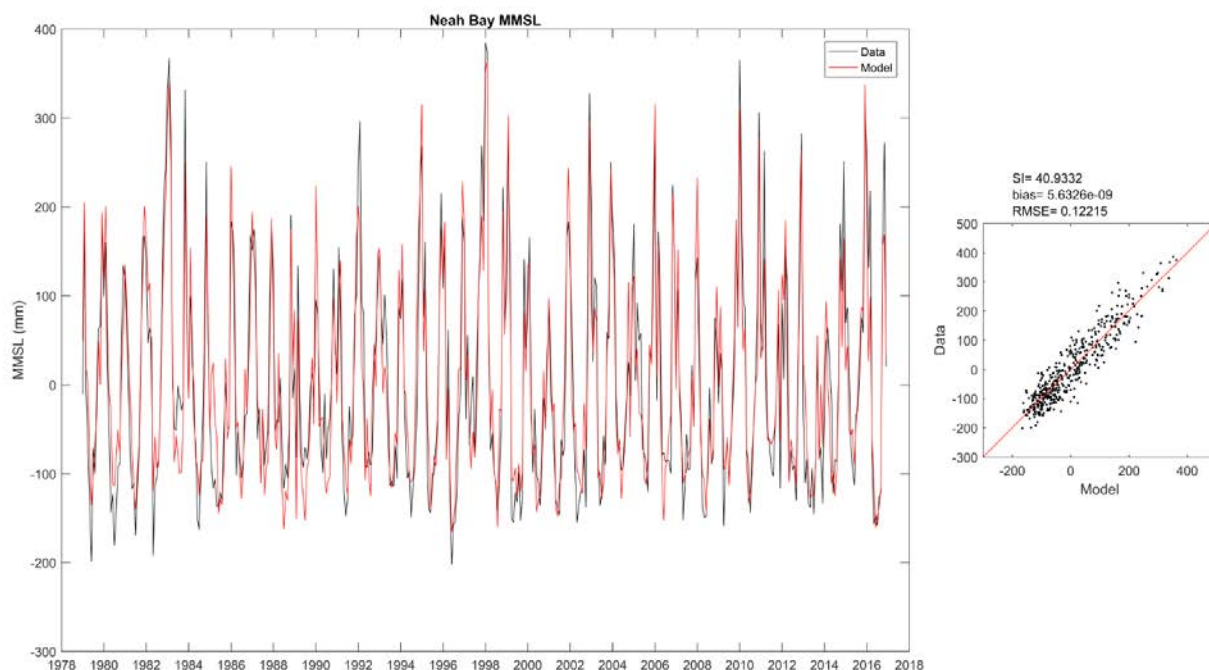


Figura 35: Nivel medio del mar mensual en Neah Bay.

5. Aplicación en 20CR

El objetivo del siguiente apartado consiste en determinar la validez de la metodología propuesta implementándolo en otras bases de datos. Así pues, se ha seleccionado la fuente de 20th Century Reanalysis (20CR) para recopilar datos de presión y poder aplicar el modelo. La escala temporal que abarca el 20CR es más amplia que la del CFSR, comienza exactamente 79 años antes. Por lo tanto, las series de marea meteorológica y nivel medio del mar mensual a reconstruir serán más largas y más útiles para futuras líneas de investigación.

Respecto al proceso de implementación, se han seguido las mismas pautas que en el modelo de referencia; en primer lugar, se han creado las mallas para la descarga de datos, después, se han caracterizado los predictores necesarios para ejecutar el modelo de MM y NMMM; y una vez ejecutado, se han validado los resultados a partir de los datos de mareógrafo registrados en cada estación por NOAA.

De esta manera, se ha comenzado por generar una malla de 400x400 km centrado en cada mareógrafo de la misma forma que se realizó con el CFSR. No obstante, aunque temporalmente se haya ampliado el número de datos recopilados (desde 1900 hasta 2010), espacialmente se ha reducido su dimensión, ya que la resolución de la malla disponible pasa de ser de 0.5° a 2°. En consecuencia, se tiene una matriz de 3x3 en vez de 9x9, a la cual también se le han sido descartados los puntos situados tierra adentro.

El hecho de que disminuya la resolución del 20CR con respecto al modelo de referencia del CFSR, implica que hay que volver a ejecutar para una resolución de malla de 2° los modelos del CFSR en ambos casos, la marea meteorológica y el nivel medio del mar mensual; ya que tal y como se describirá a continuación, los datos de presión extraídos del 20CR hay que proyectarlos en la base de los componentes principales conseguido en el CFSR además de emplear los mismos coeficientes en el modelo de regresión para el cálculo del NMMM.

En los apartados 5.1 y 5.2 se describen las diferencias y consideraciones a tener en cuenta en la aplicación del 20CR.

5.1 Marea meteorológica

Tras la extracción de datos de presión, se han calculado los predictores que caracterizan el modelo de MM, es decir, los autovalores de presión y gradiente de presión al cuadrado. Sin embargo, en lugar de generar unas nuevas coordenadas (autovectores) en los que proyectar los datos de presión registrados por el 20CR, se han proyectado directamente esos valores de presión en las coordenadas obtenidas a partir del CFSR. De todos los datos proyectados solamente se han escogido aquellos que explican el 98% de la varianza.

Una vez realizada la proyección, se ha procedido a usar el Método Análogos. En este caso, en vez de discretizar la escala temporal de la intersección entre el 20CR y el periodo de funcionamiento del mareógrafo en diez subgrupos para que se reconstruya un subconjunto en función de los nueve restantes, se ha reconstruido la escala temporal del 20CR mediante la comparación de presiones teniendo en cuenta el paquete de datos del CFSR. Así pues, al igual que se ha realizado en el apartado 3.2.1 se le ha asignado al día a reconstruir el valor de la marea meteorológica en función de la similitud del valor de presión entre dicho día y todo el conjunto de datos de presión del CFSR, a los cuales les corresponde una MM obtenida por el mareógrafo para la fecha en cuestión.

Dicha similitud, también ha sido caracterizada por seleccionar únicamente los diez primeros valores de PC de presión más próximos al día a reconstruir. Tras la selección, se ha calculado su peso y ejecutado la simulación de Monte Carlo de la misma manera que anteriormente, con 1000 valores aleatorios entre 0 y 1. Dependiendo del número aleatorio generado por Monte Carlo, la MM asignada a cada día será:

1. Si el número aleatorio $\geq w_1$ la MM asignada es la del predictor más cercano.
2. Si el número aleatorio $\leq w_{10}$, la MM asignada es la del décimo predictor más cercano.
3. Si $w_1 \leq \text{número aleatorio} \leq w_{10}$, la MM asignada es la del peso más cercano.

Al disponer de 1000 resultados de MM para cada día reconstruido y dada su dificultad de cuantificación por contribuir en el nivel del mar total con escasos milímetros, se ha

representado el resultado como el percentil 5, 50 y 95. Los resultados obtenidos en San Diego, San Francisco y Neah Bay se adjuntan a continuación:

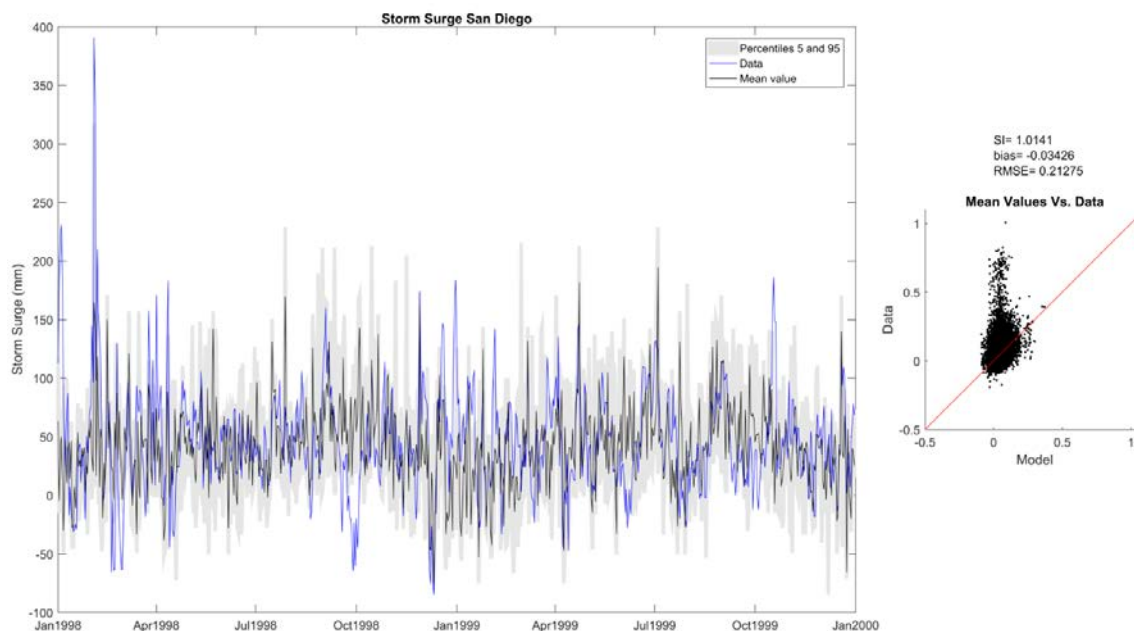


Figura 36: Marea meteorológica en San Diego.

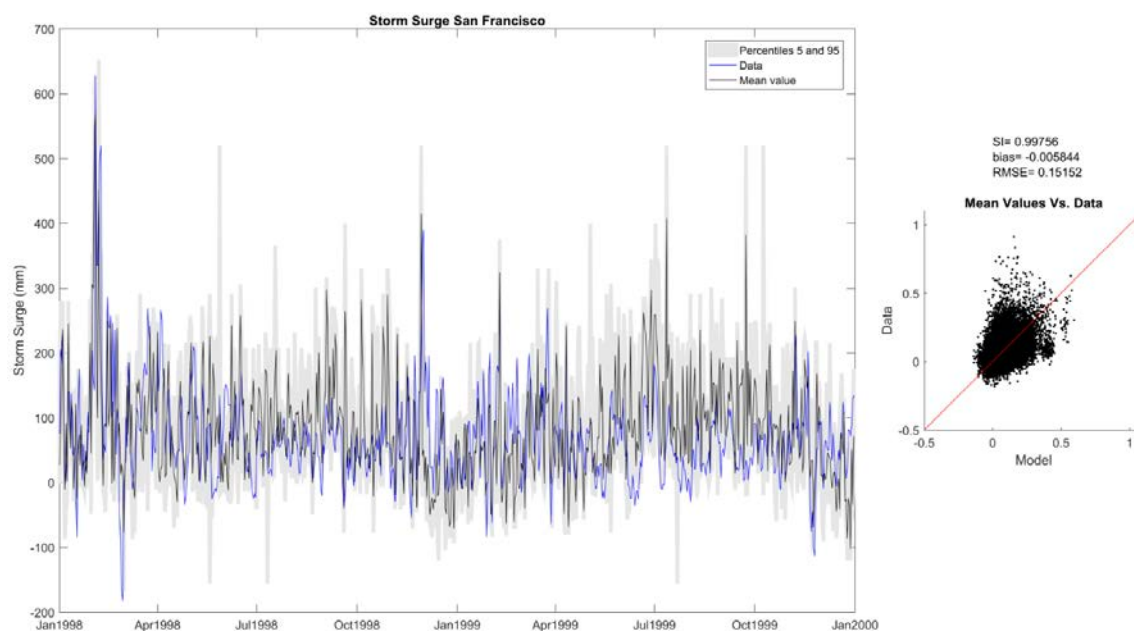


Figura 37: Marea meteorológica en San Francisco.

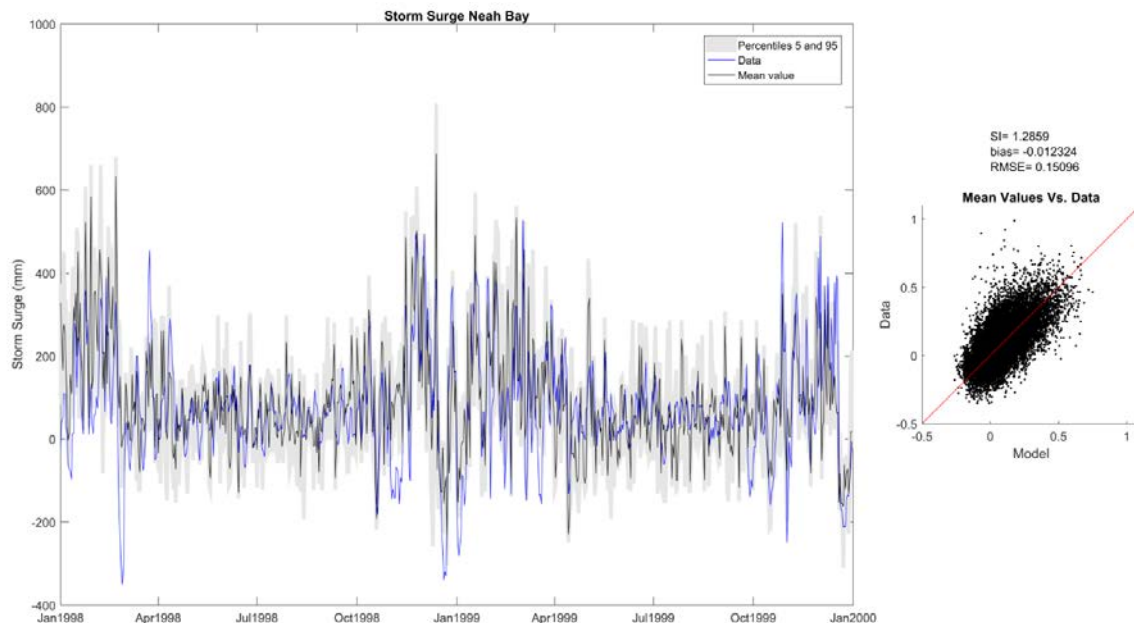


Figura 38: Marea meteorológica en Neah Bay.

Según los resultados conseguidos, el comportamiento del modelo no varía con respecto a los resultados obtenidos en el apartado 4.1; a medida que se aumenta la latitud la precisión del modelo de reconstrucción de marea meteorológica mejora considerablemente.

Por otra parte, cabe destacar la forma de la gráfica de dispersión en San Diego. El modelo no es capaz de reconstruir los valores extremos de MM, por lo que la gráfica adopta una forma casi vertical en la que todos los puntos se concentran en la zona izquierda de la línea roja de 45 grados, resultando que los valores detectados por el mareógrafo son bastante mayores que los reconstruidos.

En San Francisco, aunque visualmente no se aprecie tan fácilmente, la incapacidad del modelo de predecir valores extremos queda expuesta también en la gráfica de dispersión.

Con el fin de analizar el porqué de dicho problema, se representó la serie de la marea meteorológica en ambas estaciones desde 1900 hasta 2017. En ella se detectó que antes de 1979, que es cuando comienza el registro de presiones en el CFSR, el mareógrafo registró mayores valores de marea meteorológica. Por lo tanto, el modelo de reconstrucción ha sido entrenado con menores valores de presión que no son aptos para simular los extremos.

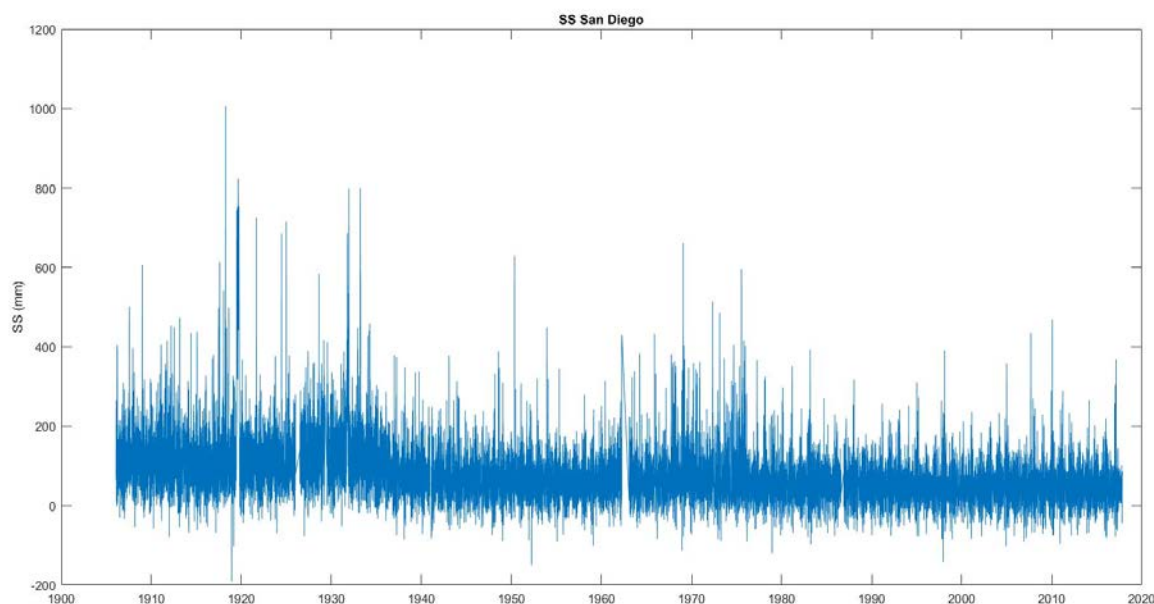


Figura 39: Datos de mareógrafo desde 1900 hasta 2017. Se observa cómo se registraron mayores valores de marea meteorológica antes de 1979.

5.2 Nivel medio del mar mensual

Tal y como se acaba de mencionar al comienzo de la sección 5, se han tenido que extraer nuevamente los datos de presión del CFSR de las mallas de 400x400 km de dimensión con una resolución de dos grados, y poder regenerar las nuevas coordenadas de proyección de las componentes principales, así como recalcular los coeficientes del modelo de regresión. Tras su modelización y consiguiente descarga de datos de presión de la base de datos del 20CR, se ha procedido a obtener los predictores necesarios.

Aunque los predictores de temperatura superficial del agua del mar no se han tenido que modificar, los predictores de presión obviamente sí. Éstos antes del cálculo para obtener las anomalías medias mensuales de presión, han sido proyectados en los ejes antiguos de la base de vectorial del CFSR. De la misma manera, también se han identificado las componentes que expresan el 98% de la varianza.

Una vez reducida la dimensión en base a los modos predominantes que caracterizan la presión en cada localización, se han calculados las anomalías medias de presión siguiendo el mismo procedimiento descrito en el apartado 3.2.2.

Respecto al modelo de regresión, la función empleada ha sido idéntica, teniendo ésta dos partes diferenciadas, la relativa a las anomalías mensuales de presión y la correspondiente a la temperatura superficial del agua del mar. No obstante, como el objetivo es verificar la aplicación del modelo en otra base de datos, los coeficientes que caracterizan la regresión no han sido recalculados, sino que se han empleado los previamente logrados con el CFSR en sus respectivas estaciones de mareógrafo. A continuación, se muestran los coeficientes obtenidos en San Diego y las gráficas que resultan de aplicar el modelo en San Diego, San Francisco y Neah Bay.

$$\begin{aligned}
 MMSL = & a_0 + a_1 PC1_{SSTa} + a_2 PC2_{SSTa} + a_3 PC3_{SSTa} + (a_4 + a_5 PC1_{SSTa} + \dots) \cos\left(\frac{2\pi t}{365}\right) \\
 & + (a_8 + a_9 PC1_{SSTa} + \dots) \sin\left(\frac{2\pi t}{365}\right) + (a_{12} + a_{13} PC1_{SSTa} + \dots) \cos\left(\frac{4\pi t}{365}\right) \\
 & + (a_{16} + a_{17} PC1_{SSTa} + \dots) \sin\left(\frac{4\pi t}{365}\right) + a_{20} \overline{PC1_{SLPa}} + a_{21} \overline{PC2_{SLPa}} + \dots
 \end{aligned}$$

a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉
1,4637	0,6517	-0,415	-0,486	67,778	0,5995	0,001	0,0159	20,9337	0,6127
a ₁₀	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a ₁₆	a ₁₇	a ₁₈	a ₁₉
-0,024	0,3273	9,0516	-0,291	0,1517	-0,421	-11,83	0,2824	0,0062	0,6562
a ₂₀	a ₂₁	a ₂₂							
-15.38	-31,72	9,156							

Tabla 3: Coeficientes del modelo de regresión para San Diego

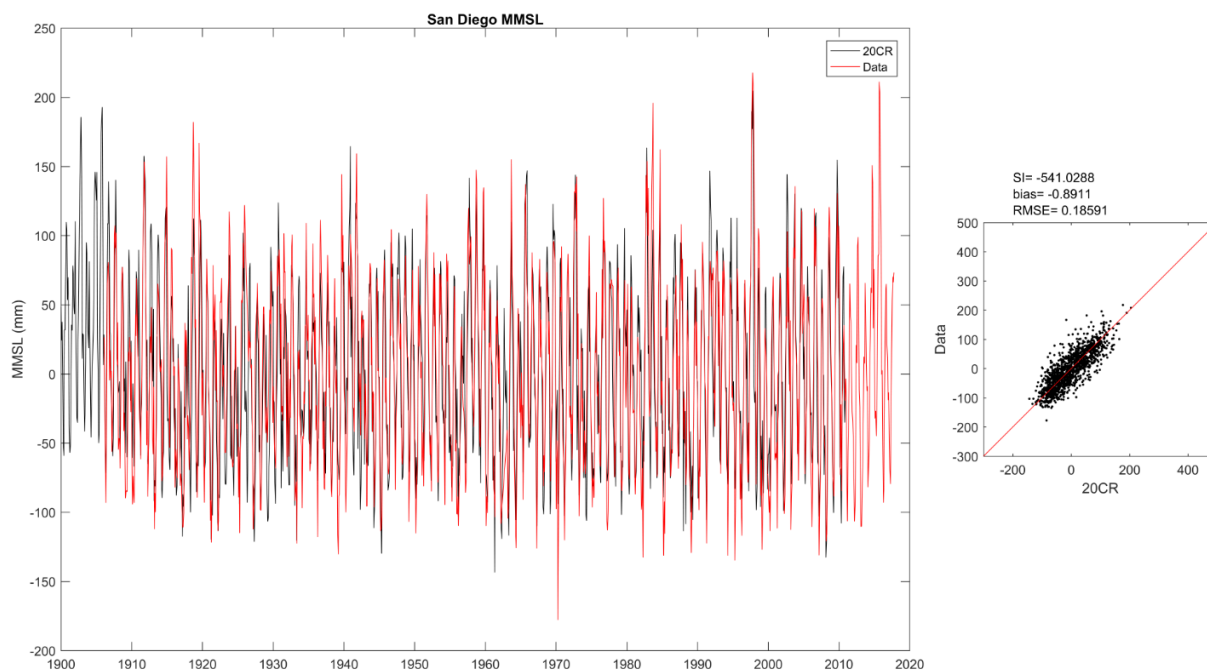


Figura 40: Nivel medio del mar mensual en San Diego.

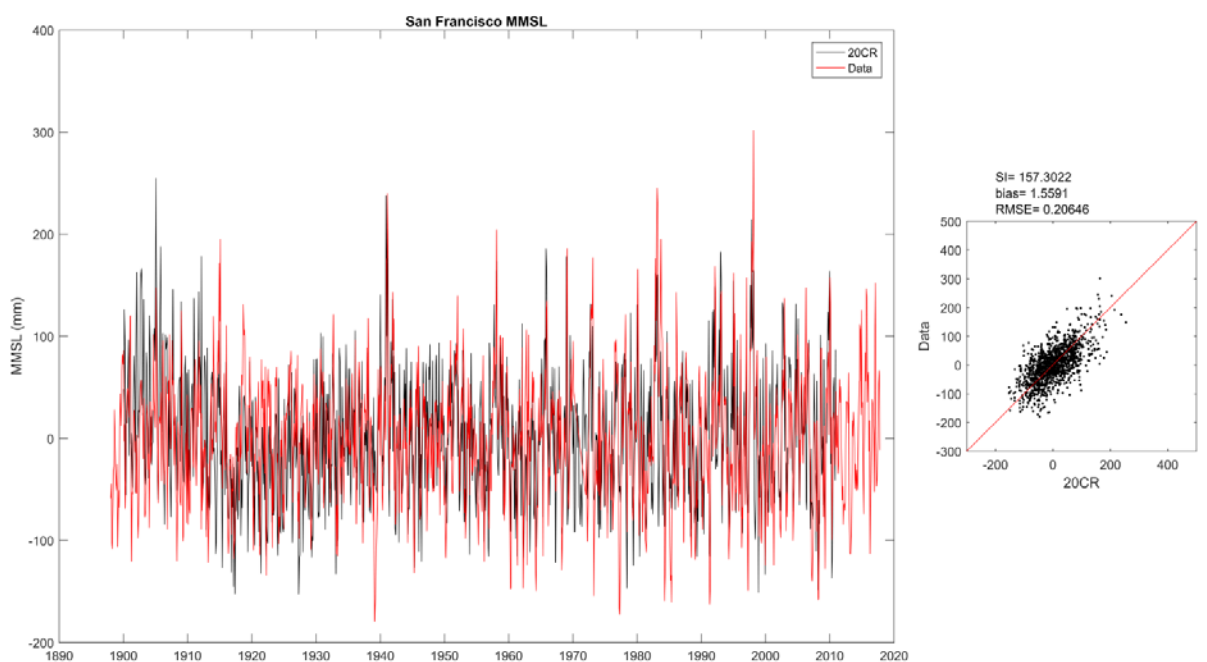


Figura 41: Nivel medio del mar mensual en San Francisco.

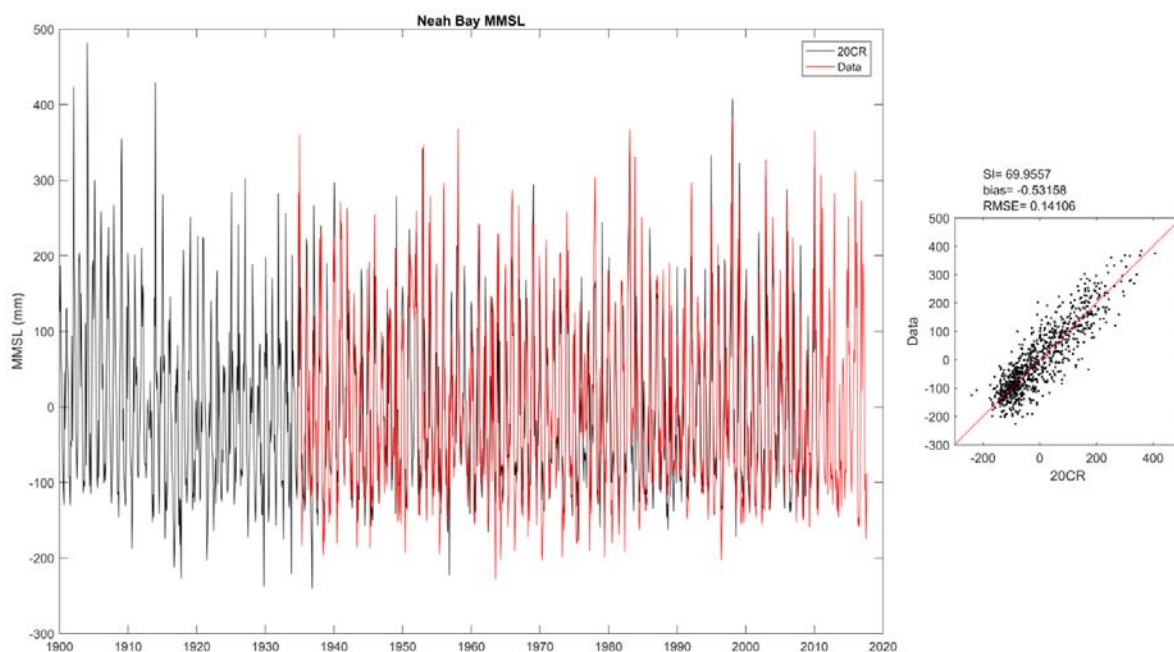


Figura 42: Nivel medio del mar mensual en Neah Bay.

A diferencia de la marea meteorológica, los resultados logrados son nuevamente satisfactorios. La serie reconstruida se ajusta correctamente a la línea de 45° independientemente de la posición geográfica del mareógrafo. De esta manera, se podrá emplear este modelo para poder regenerar incluso series más largas de nivel medio mensual a partir de datos de presión que hayan podido haber sido registradas en otras bases de datos.

6. Conclusiones

En el presente estudio han sido desarrollados dos modelos de downscaling estadístico para caracterizar la marea meteorológica y el nivel medio del mar mensual. Dicha modelización de las variables mencionadas ha sido llevada a cabo en 23 mareógrafos situados a lo largo de la Costa Oeste de los Estados Unidos, desde California hasta Washington.

La metodología implementada en el estudio para ambas componentes del nivel del mar ha consistido en primer lugar en la creación de los modelos basados en métodos estadísticos, posteriormente se ha validado su similitud con los datos registrados a tiempo real a través de la red de mareógrafos de NOAA, y finalmente se han aplicado los modelos a otra base de datos diferente, con el fin de reconstruir históricamente la marea meteorológica, así como el nivel medio del mar mensual.

En relación a la marea meteorológica, los datos de partida empleados han resultado ser las componentes principales de los datos de presión y gradientes de presión al cuadrado máximas diarias, que han sido extraídas de la base de datos del CFSR con una malla de 400x400 km con una resolución de 0.5°. Dichas componentes principales explican el 98% de la varianza. Una vez extraídos los valores de presión, se ha calculado la marea meteorológica registrada en cada mareógrafo, de modo que a cada día le corresponda un valor de presión y marea meteorológica.

Tal y como se ha mencionado a lo largo del documento, dada la dificultad de predicción de la marea meteorológica, se ha definido su resultado a través del percentil 95, 50 y 5. Para ello, se ha empleado el Método de Análogos junto con simulaciones de Monte Carlo. A través del Análisis de Análogos, se asigna al día a reconstruir el valor de la marea meteorológica en función de la similitud de la presión entre dicha fecha y el conjunto de datos de calibración disponible. De esta manera, se han podido identificar los diez puntos más próximos a la fecha a reconstruir y posteriormente calcular su peso, de forma que mediante mil simulaciones entre 0-1 para cada día se compara el número aleatorio resultante con los pesos previamente calculados. Dependiendo de la condición que cumpla el número aleatorio simulado (sección 3.1.2), a cada iteración le corresponde una marea meteorológica, teniendo 1000 resultados para

cada día. En consecuencia, se calculan los percentiles 5, 50 y 95 de modo que se expresa la marea meteorológica a partir de un rango estadístico.

Respecto al nivel medio del mar mensual, el resultado se ha expresado mediante un único valor. Los predictores necesarios para su caracterización han sido las anomalías mensuales bien de presión y bien de temperatura de la superficie del agua del mar. Las anomalías mensuales de presión han sido obtenidas a partir de los datos de presión diarios extraídos para la marea meteorológica, mientras que las anomalías mensuales de temperatura superficial del agua de mar han sido extraídas de la base de datos de ERSST v4.

Tras la obtención de los predictores, se ha formulado el modelo de regresión que define el nivel medio del mar mensual. Dicho modelo se divide en dos partes de modo que los coeficientes de las componentes principales de las presiones (SLP) están correlacionados linealmente entre ellas, mientras que los términos asociados a las componentes principales de la temperatura superficial del agua del mar (SST) se ajustan a las variaciones estacionales, pudiéndose corresponder a ondas subarmónicas.

Una vez se han ejecutado ambos modelos a partir de la base de datos de presión del CFSR así como con el 20CR, los resultados muestran que para la marea meteorológica la reconstrucción no se asemeja a los datos registrados por los mareógrafos tan bien como se esperaba, por lo que es necesario seguir mejorando el modelo. Para ello, sería recomendable estudiar la posibilidad de modificar los predictores.

No obstante, los resultados obtenidos para la modelización del nivel del mar mensual han sido completamente satisfactorios. Independientemente de la localización de los mareógrafos, los datos reconstruidos se ajustan perfectamente a los valores registrados por los mareógrafos, llegando incluso a predecir los extremos.

Finalmente, cabe destacar la calidad de los resultados en base a la distribución espacial de los mismos. A medida que se aleja del Ecuador, esto es, se adentra hacia Washington, la reconstrucción de la marea meteorológica se ve mejorada, mientras que en zonas próximas al sur de la Costa Oeste el modelo no es capaz de predecir la marea meteorológica correctamente.

Este hecho se ve influenciado por los fuertes vientos locales que son generados al norte de la costa, de manera que, al ser la marea meteorológica de mayor magnitud en comparación con el sur, es más fácil de cuantificarlo.

Respecto a las variables que influyen en el nivel medio del mar mensual, resulta que la presión tiene un mayor efecto en las zonas altas de la Costa Oeste, mientras que la importancia de la temperatura de la superficie del agua de mar es mayor en latitudes bajas. Esta situación se correlaciona con las fluctuaciones climáticas ENSO, ya que dicho patrón afecta mayoritariamente a la zona central del Pacífico.

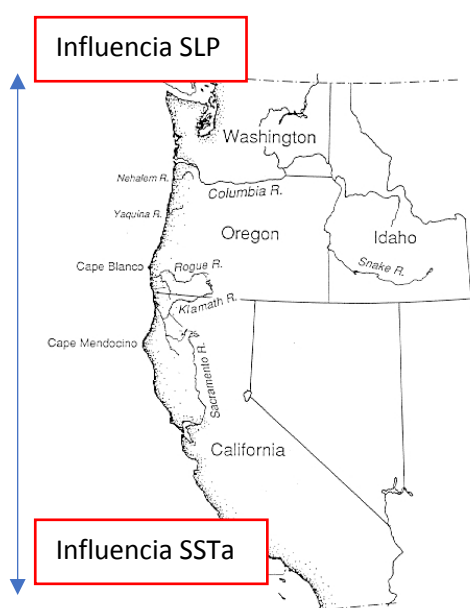


Figura 43: Distribución espacial NMMM.

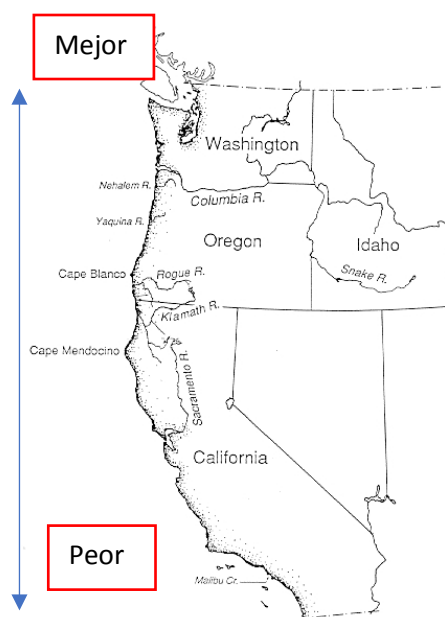


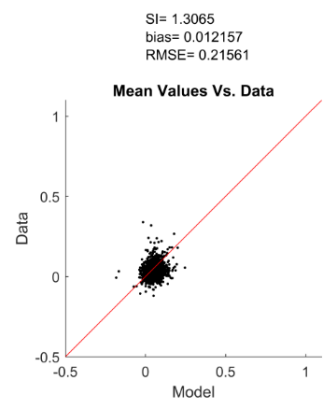
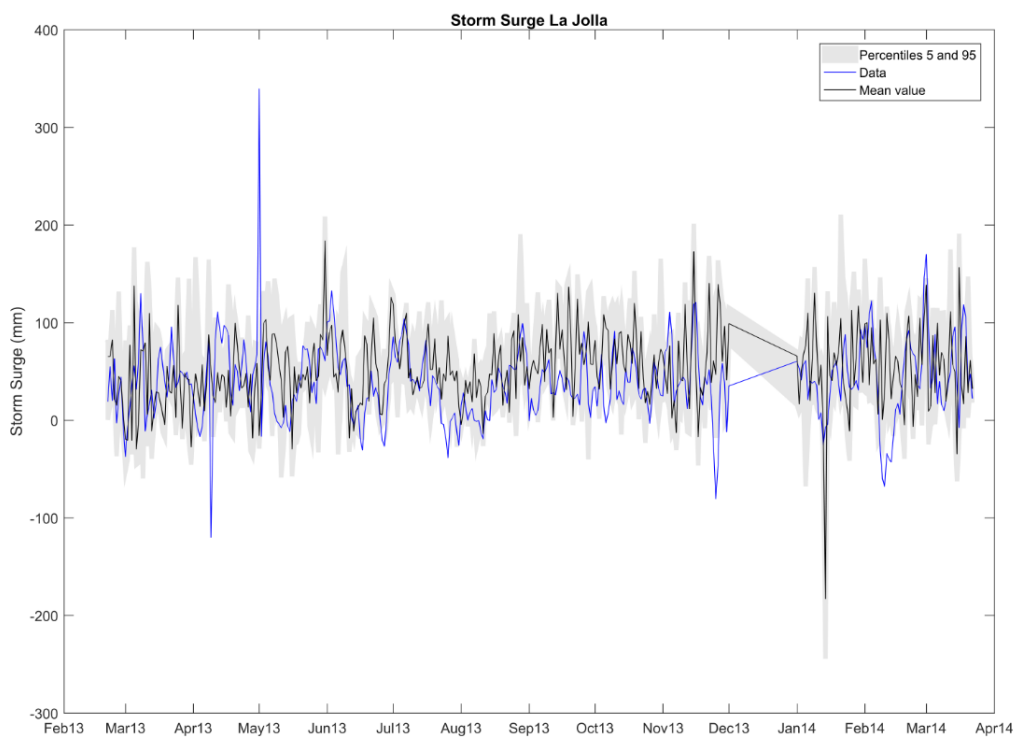
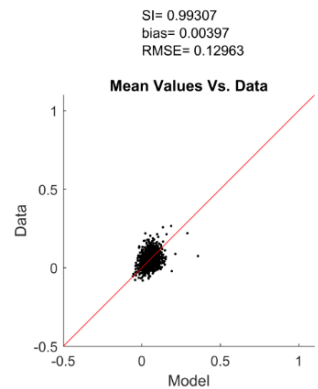
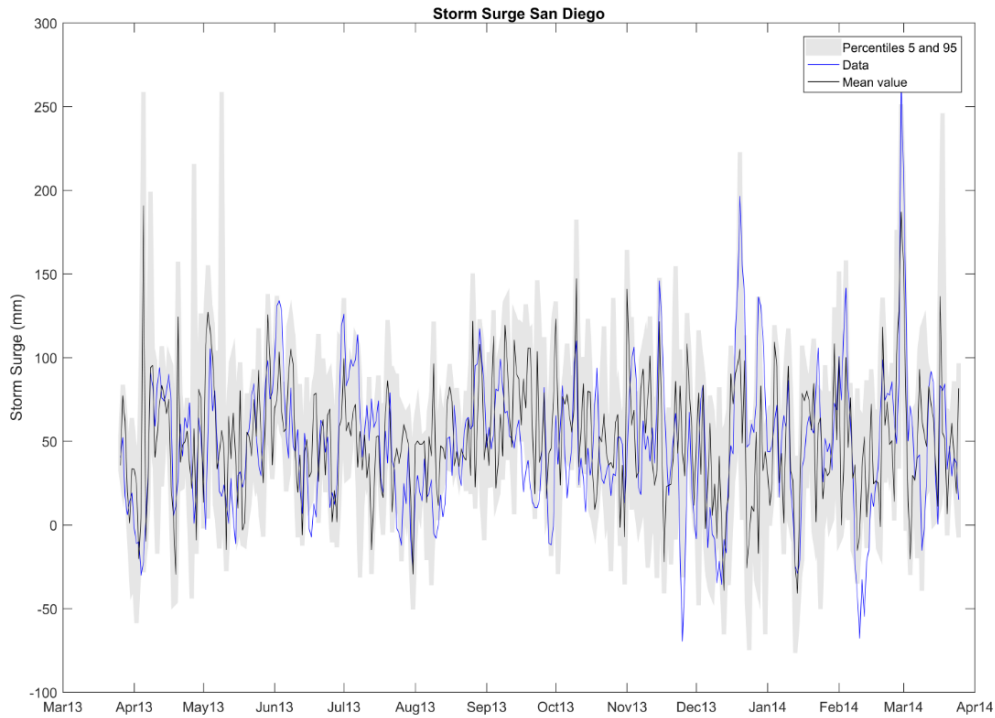
Figura 44: Distribución espacial MM.

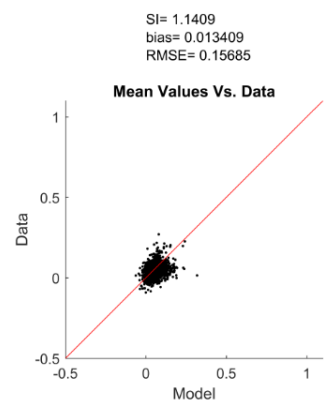
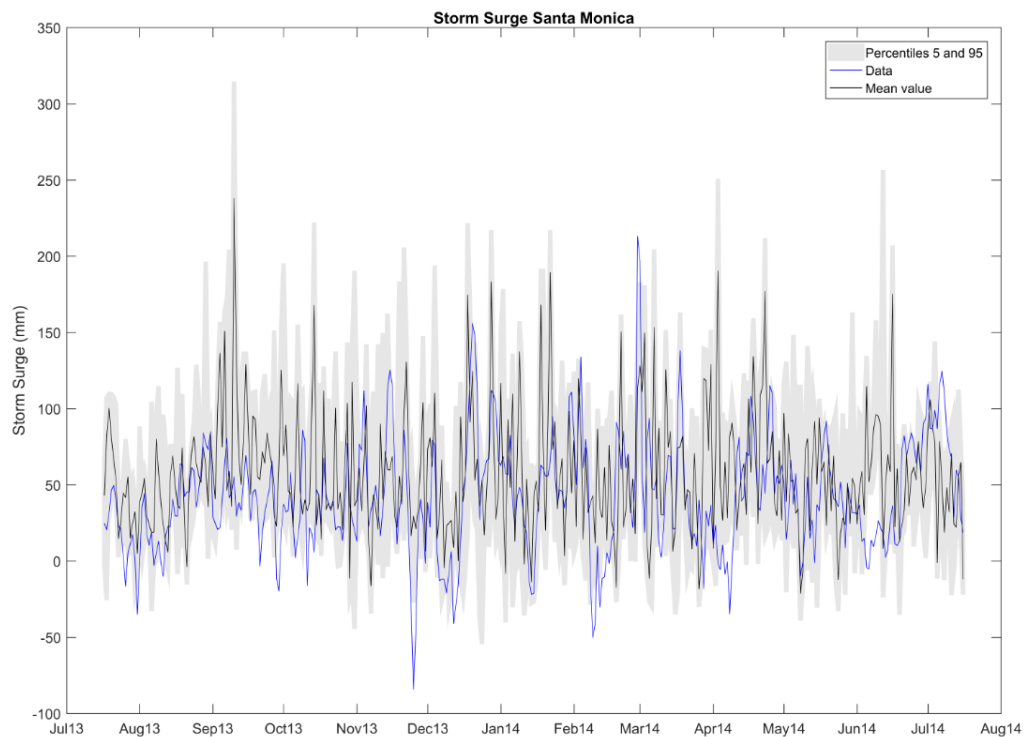
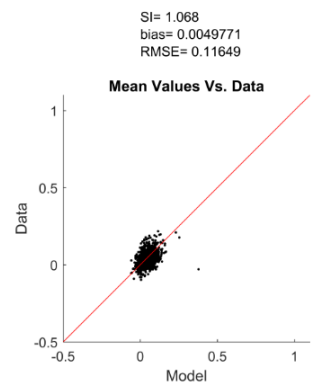
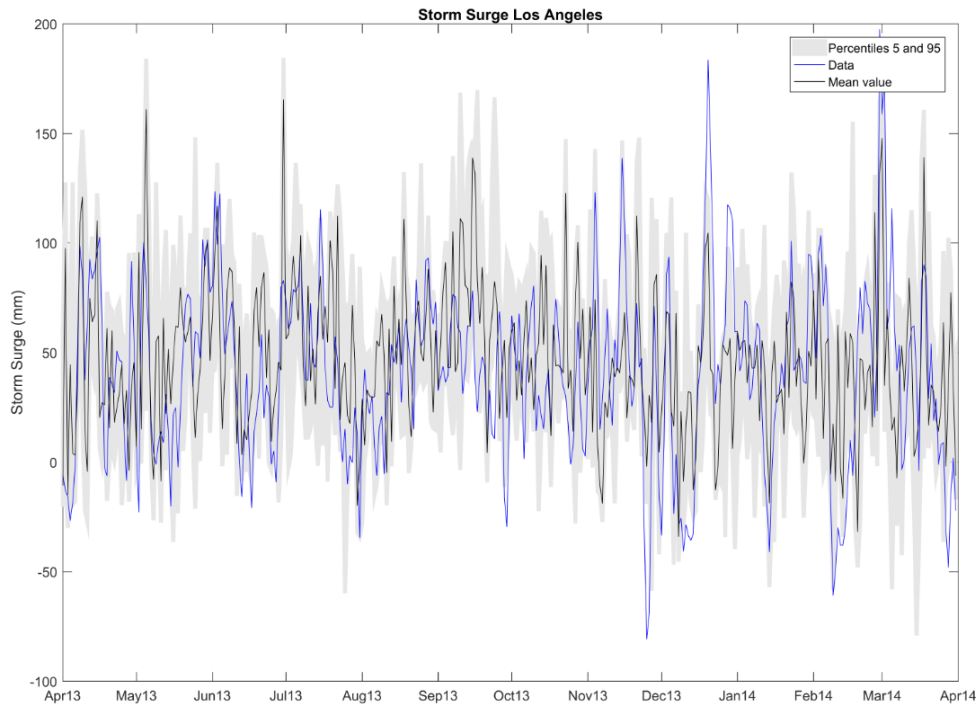
7. Bibliografía

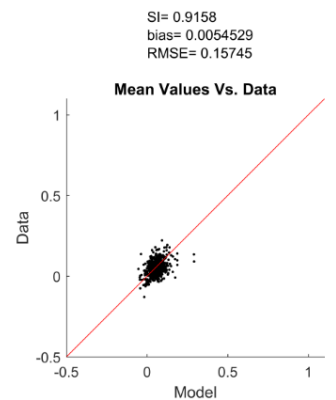
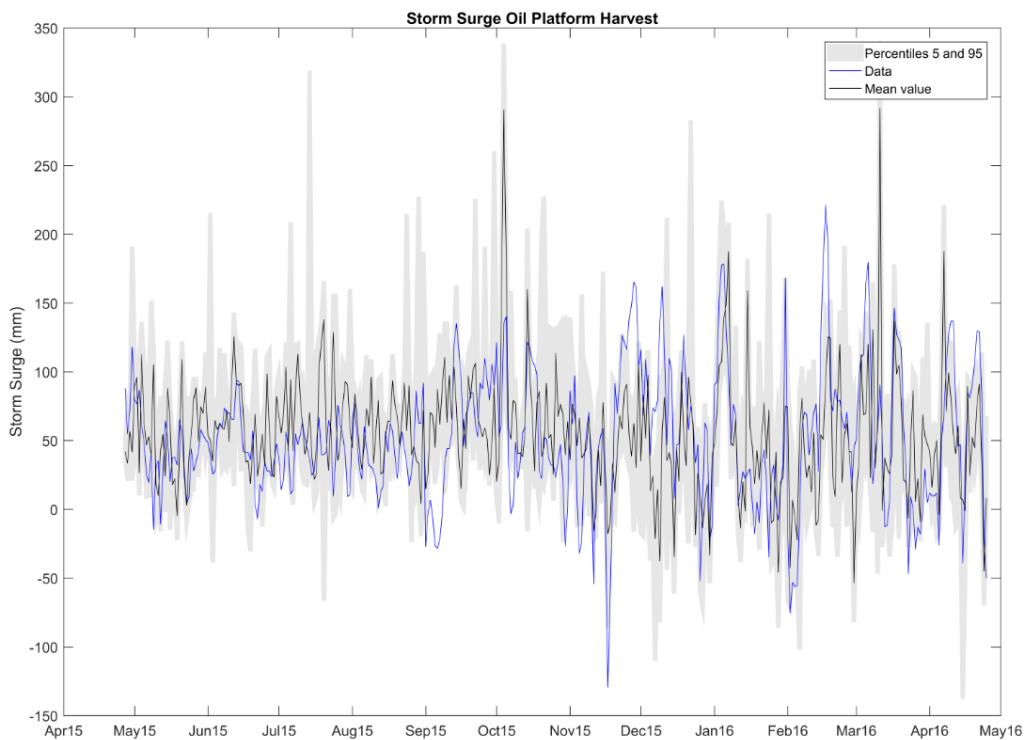
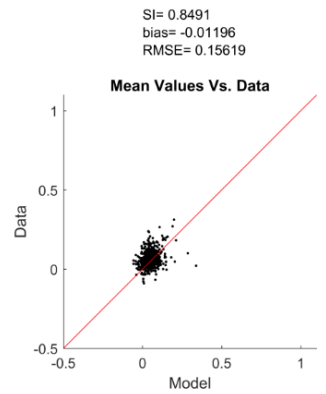
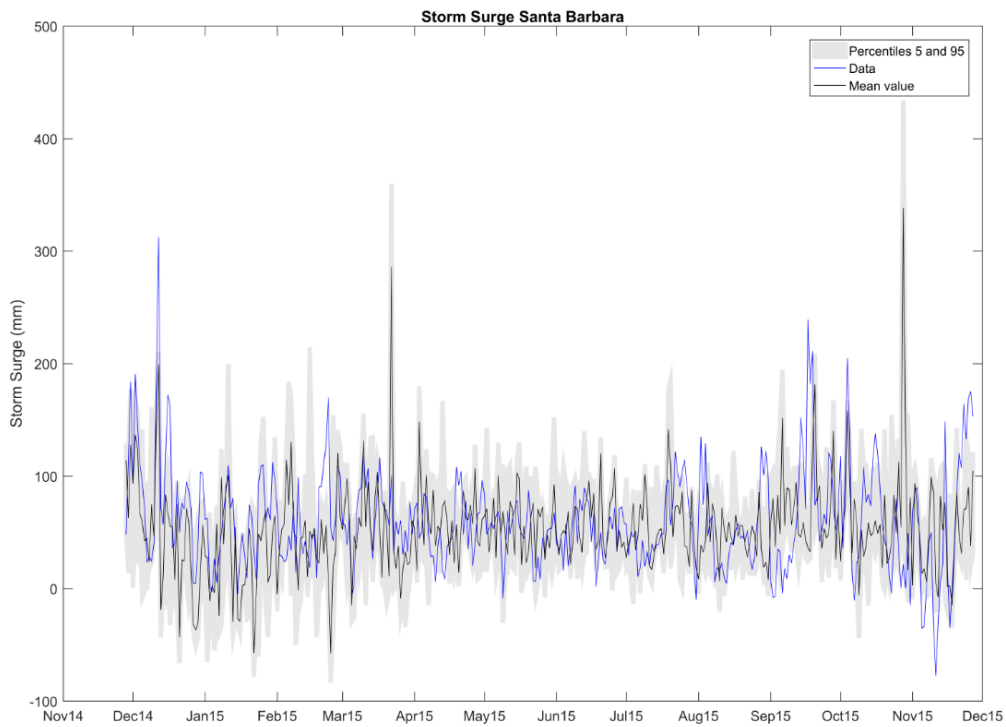
- Cid Carrera, Alba (2015): Modelado numérico y estadístico de la componente meteorológica del nivel del mar a escala regional y global. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria
- Pugh, David. T (1987): Tides, Surges and Mean Sea-Level, John Wiley & Sons
- Alba Cid, Paula Camus, Sonia Castanedo, Fernando J. Méndez, Raúl Medina 2016: Global reconstructed daily surge levels from the 20th Century Reanalysis (1871–2010), Global and Planetary Change 148 (2017) 9–21
- Dylan Anderson, Ana Rueda, Jose A. A. Antolinez, Laura Cagigal, Peter Ruggiero, Fernando J. Mendez (2018, en preparación): Time-varying Emulator for Short and Long-Term Analysis of Coastal Flooding
- Subhrendu Gangopadhyay, Martyn Clark, Balaji Rajagopalan (2005): Statistical downscaling using K-nearest neighbors, Water Resources Research, Doi 10.1029/2004WR003444

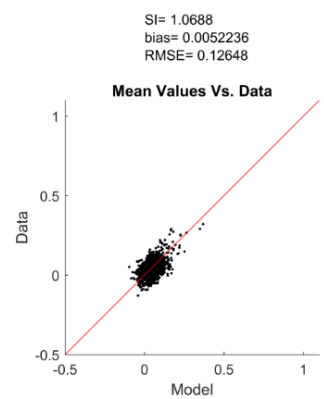
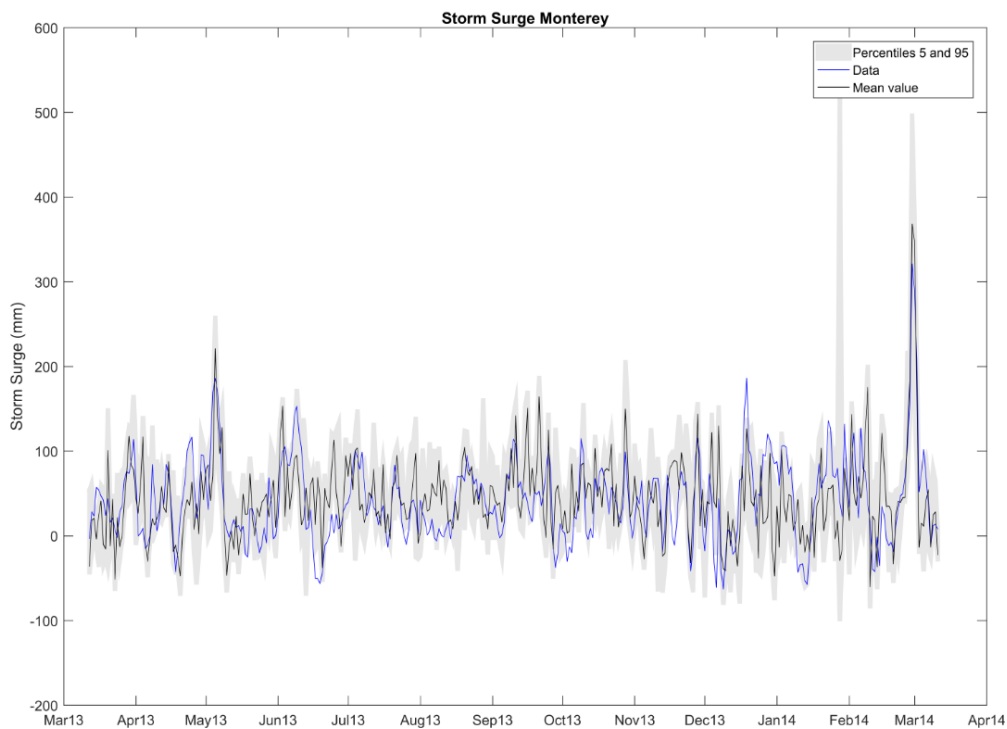
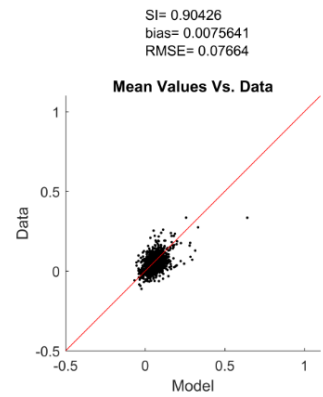
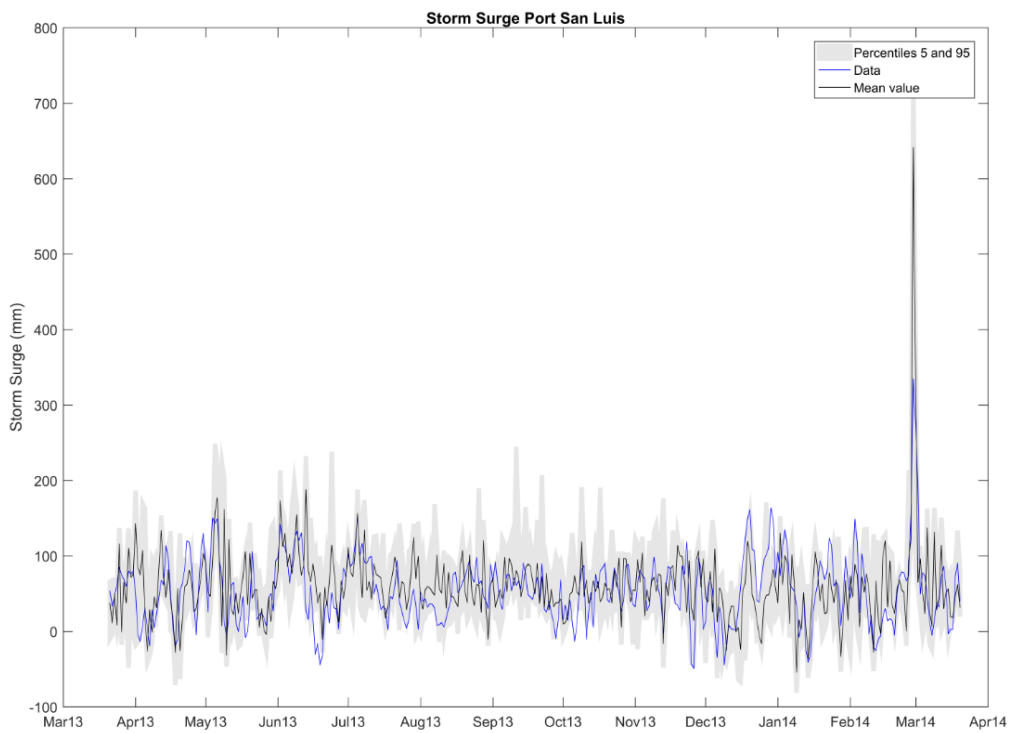
APÉNDICE 1

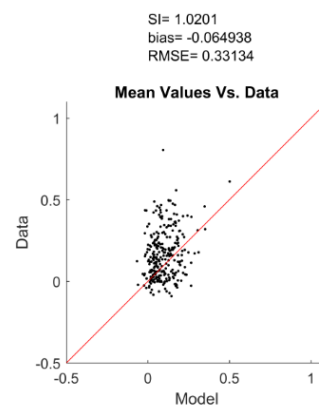
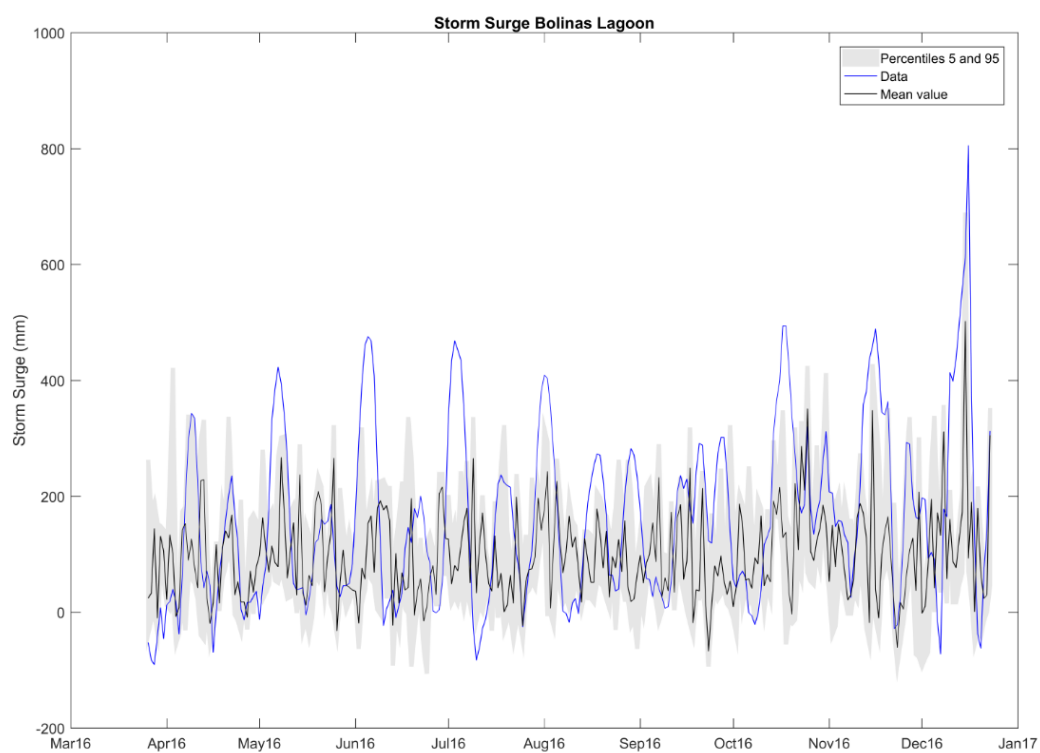
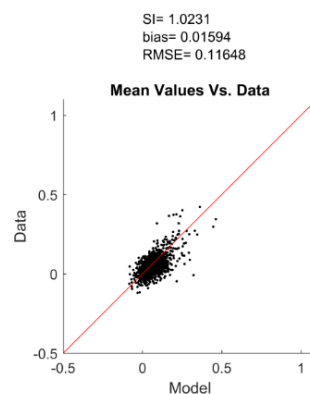
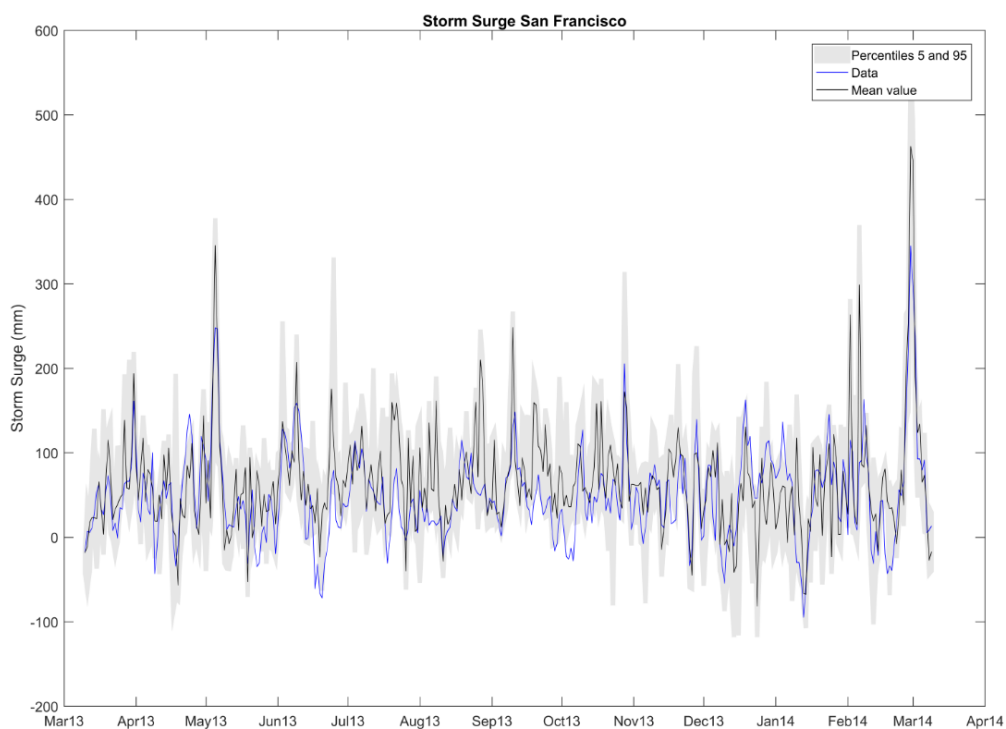
RESULTADOS DE LA MAREA METEOROLÓGICA, CFSR

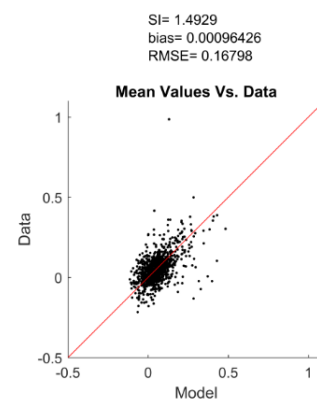
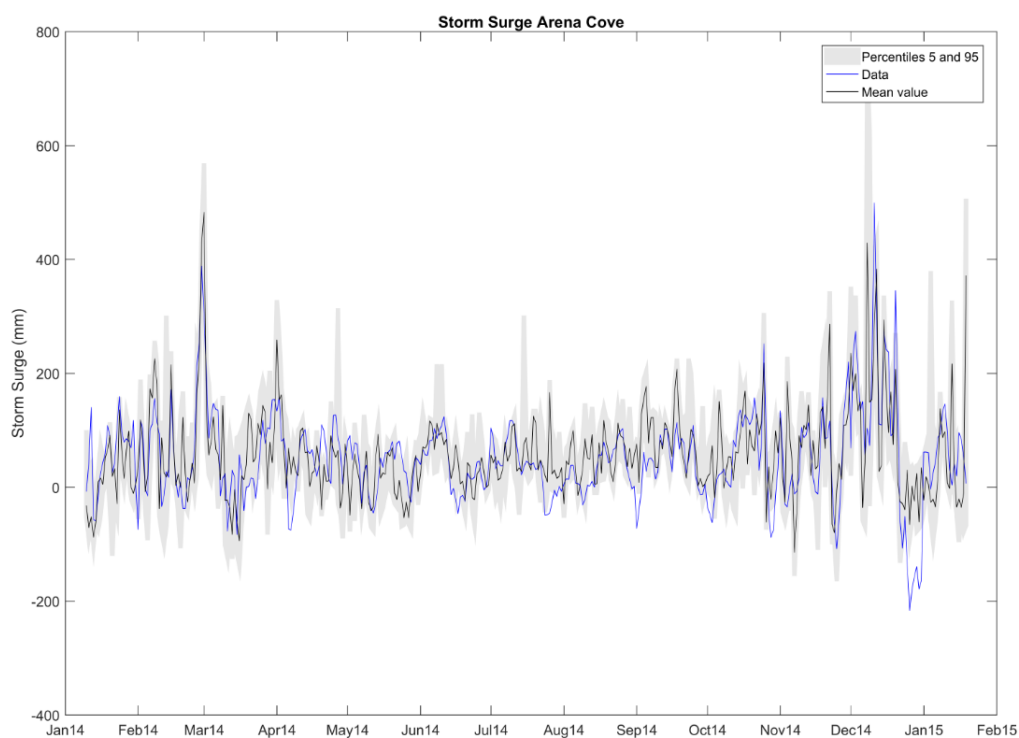
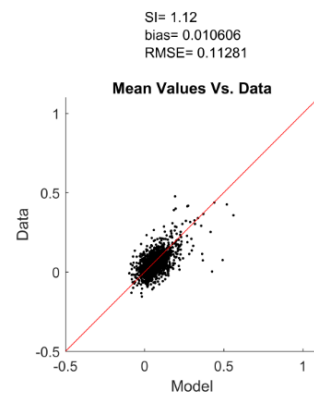
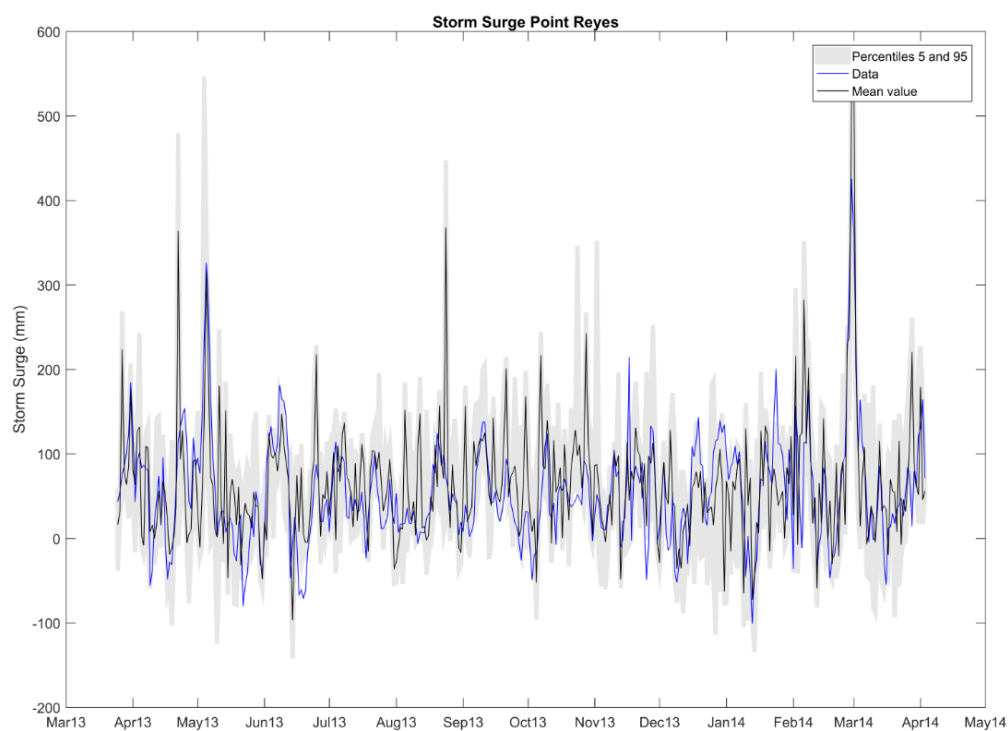


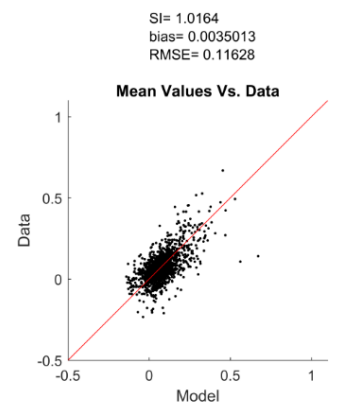
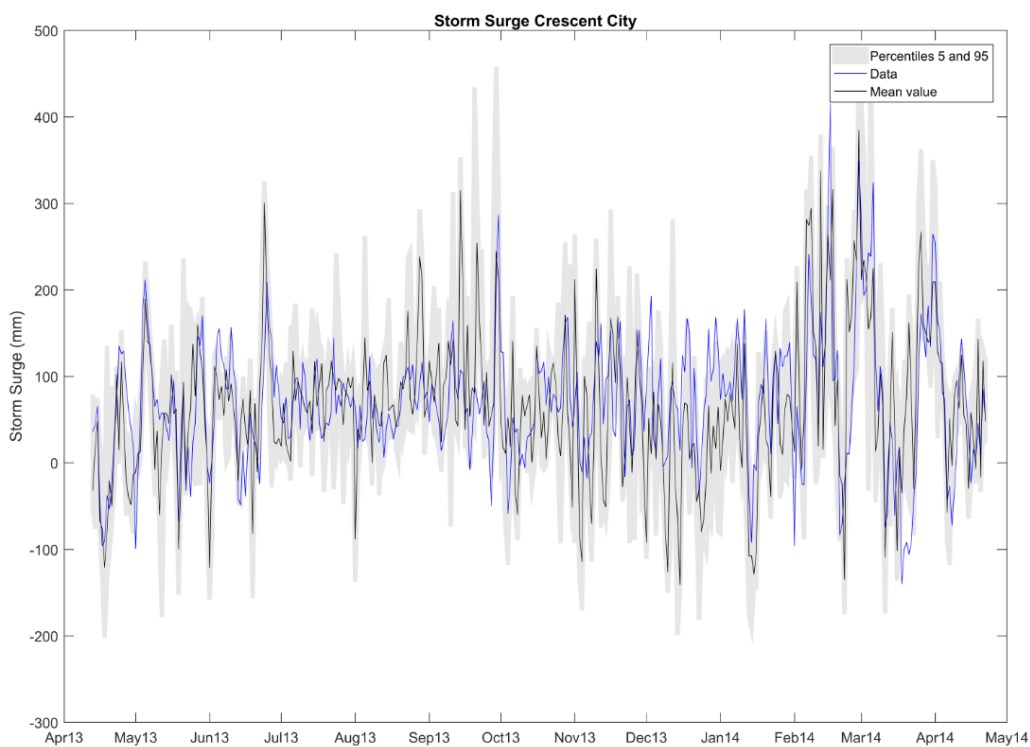
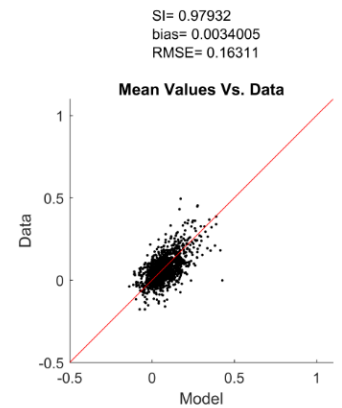
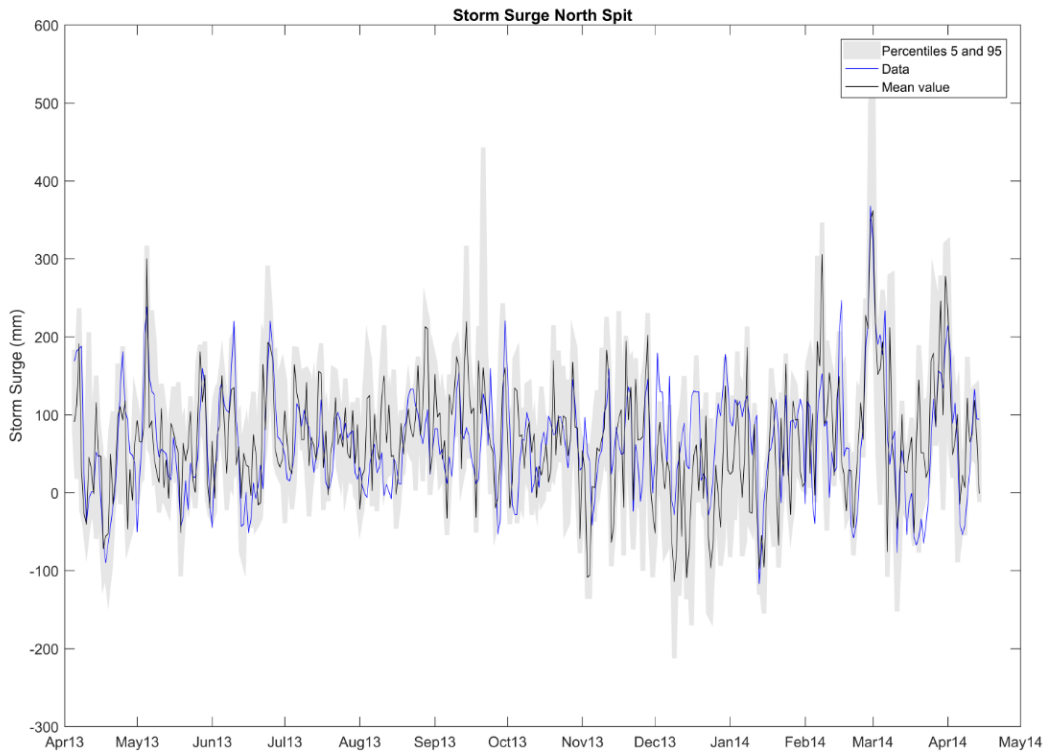


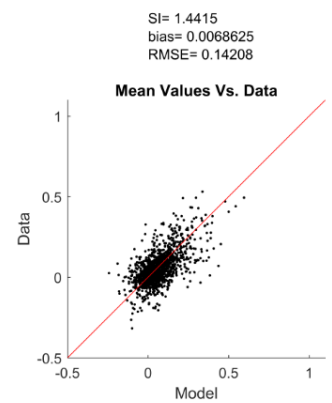
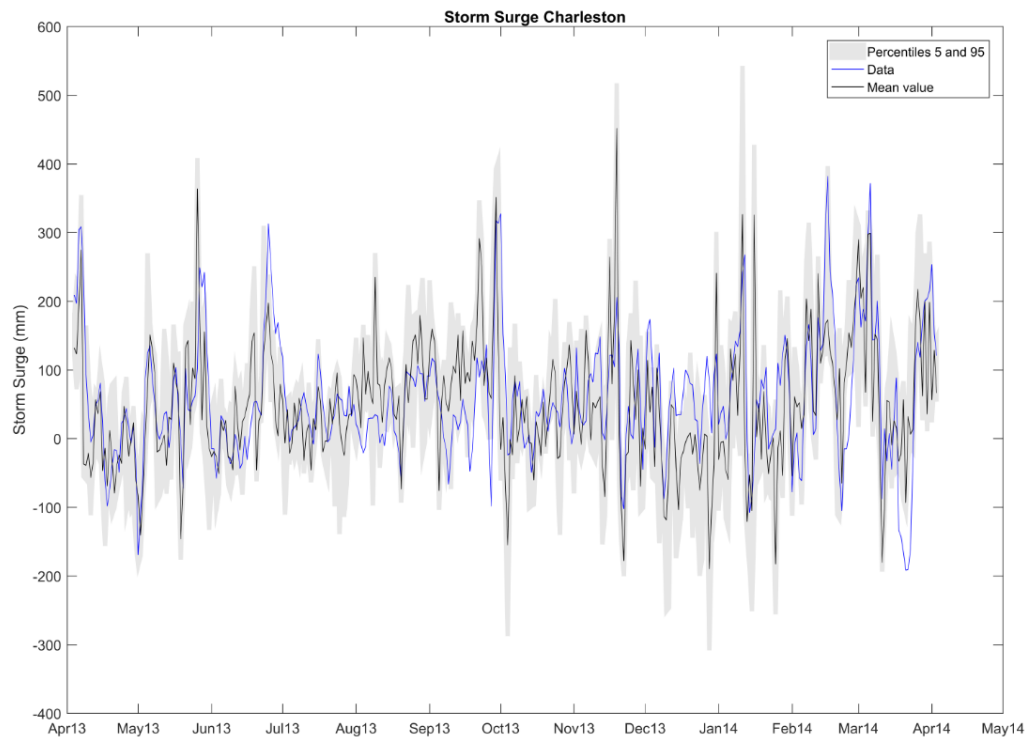
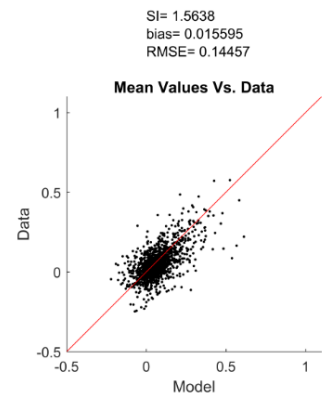
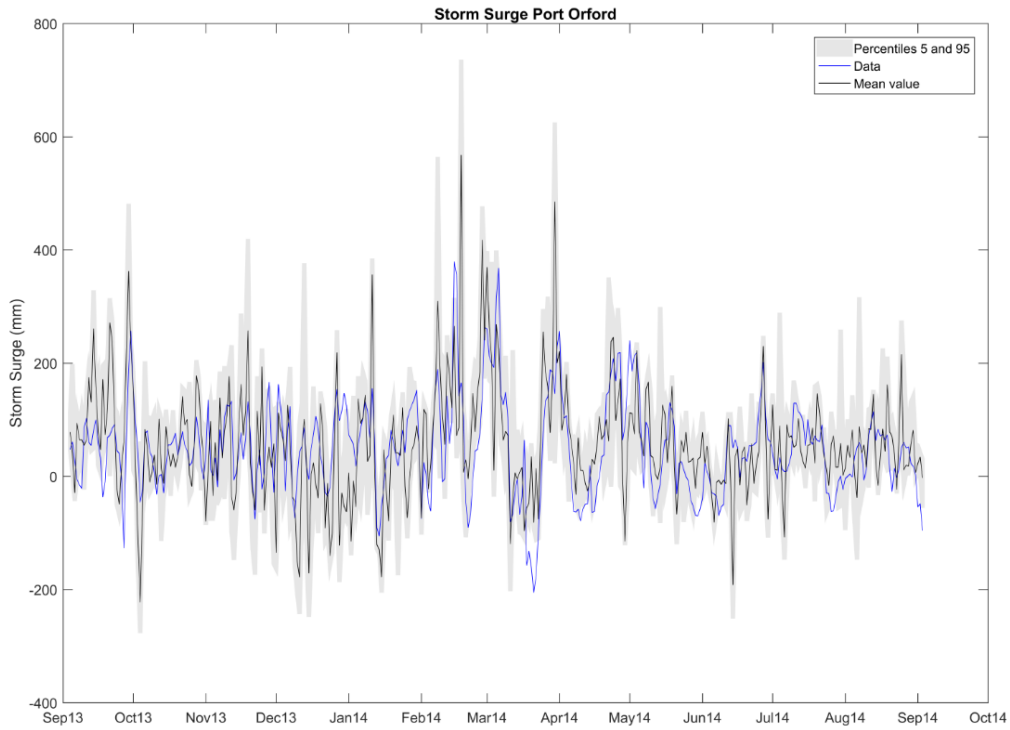


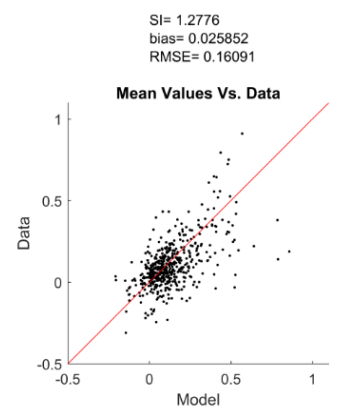
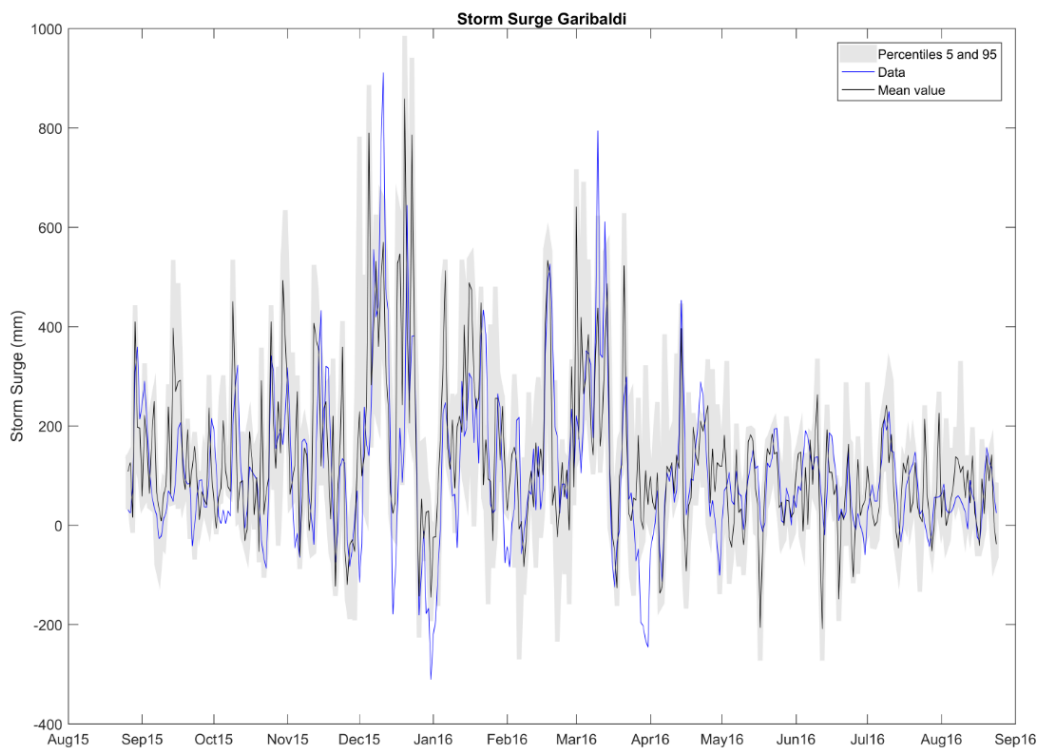
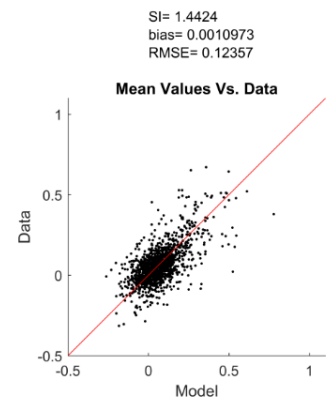
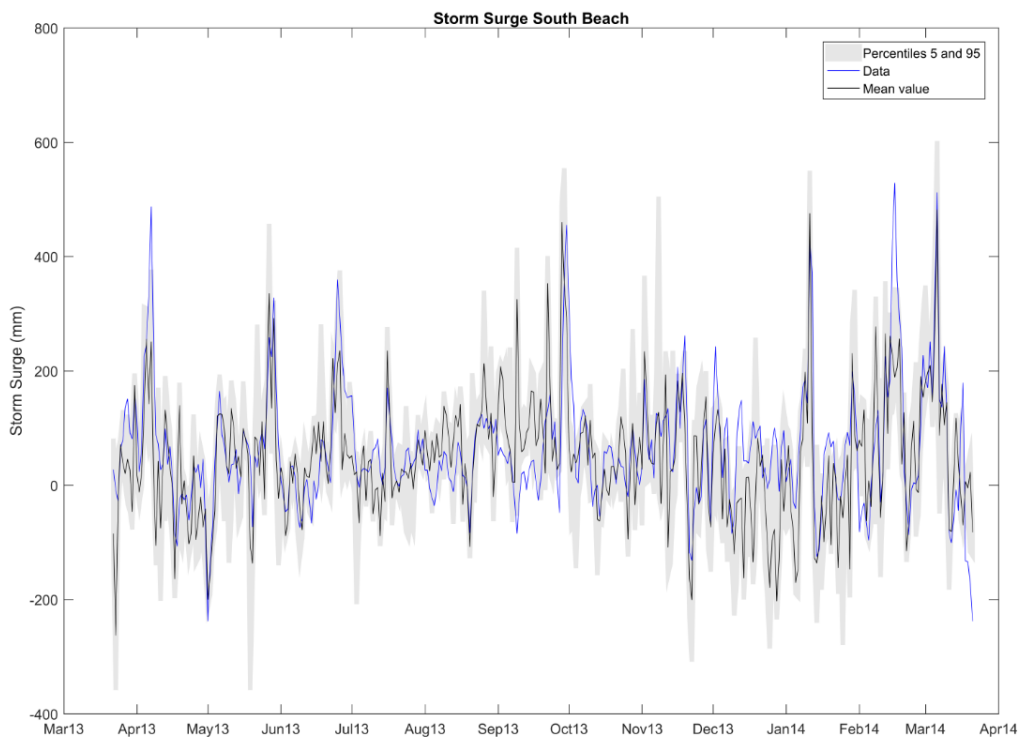


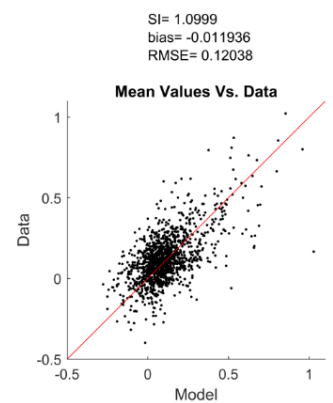
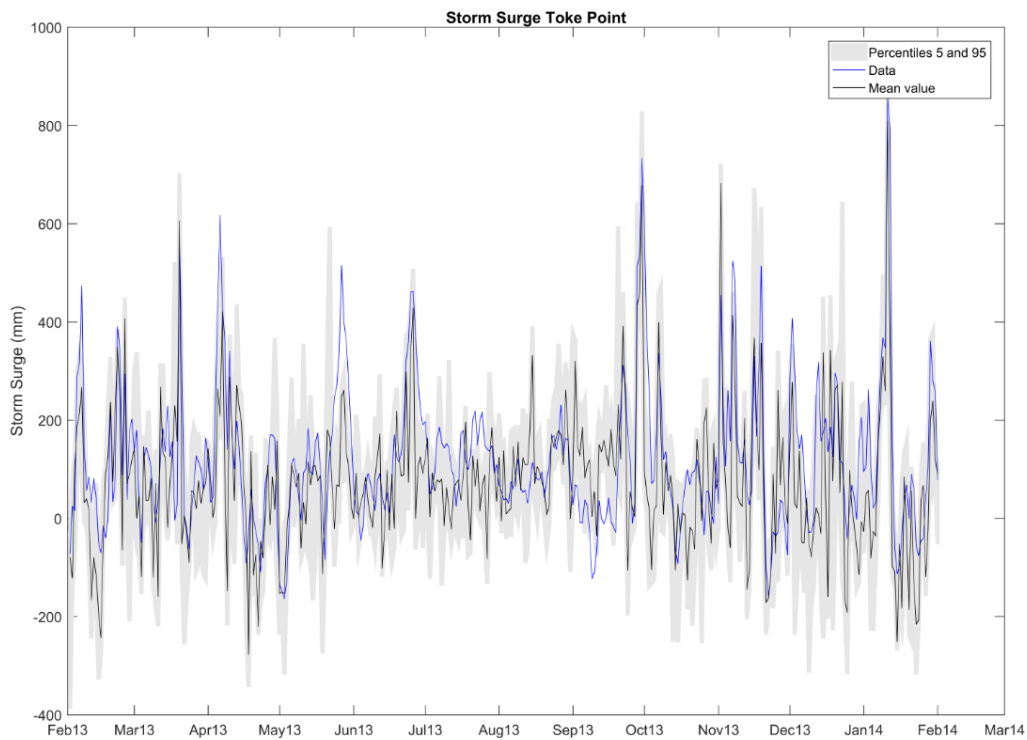
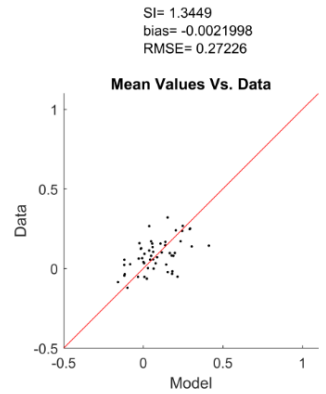
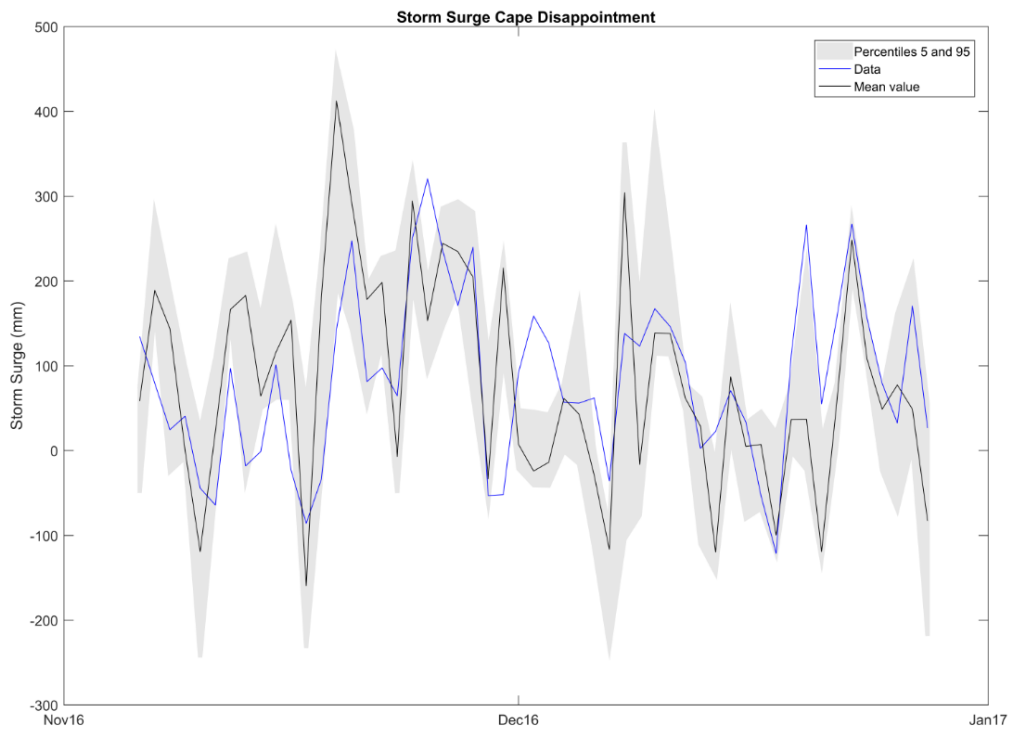


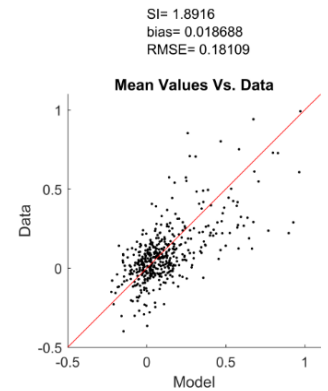
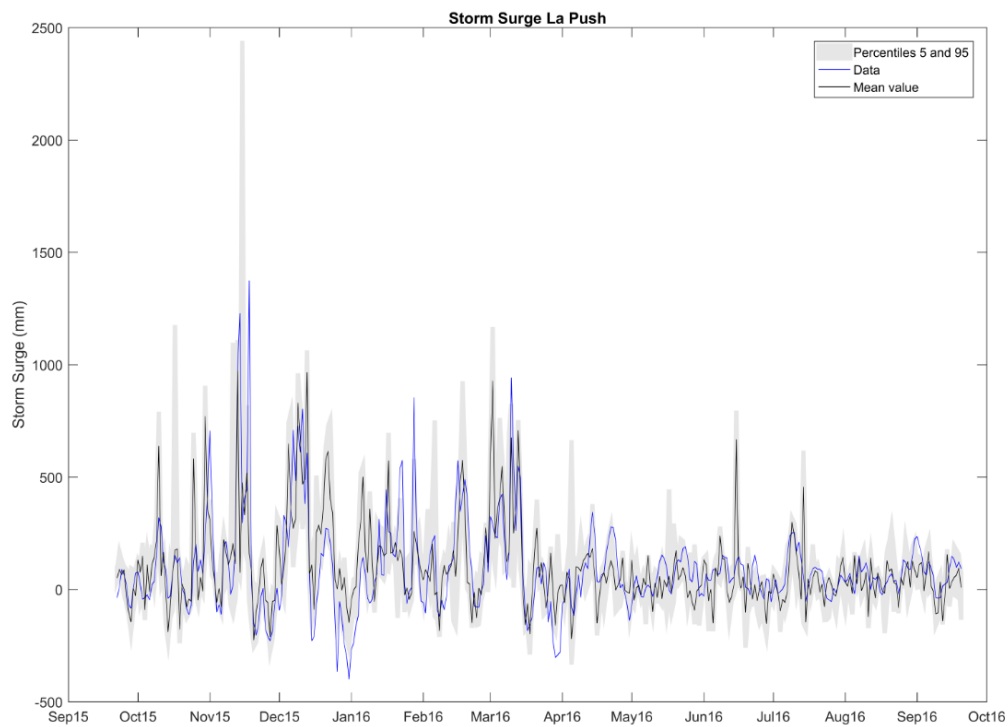
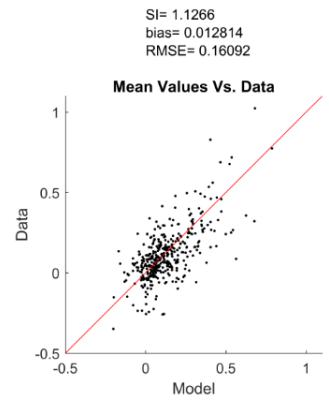
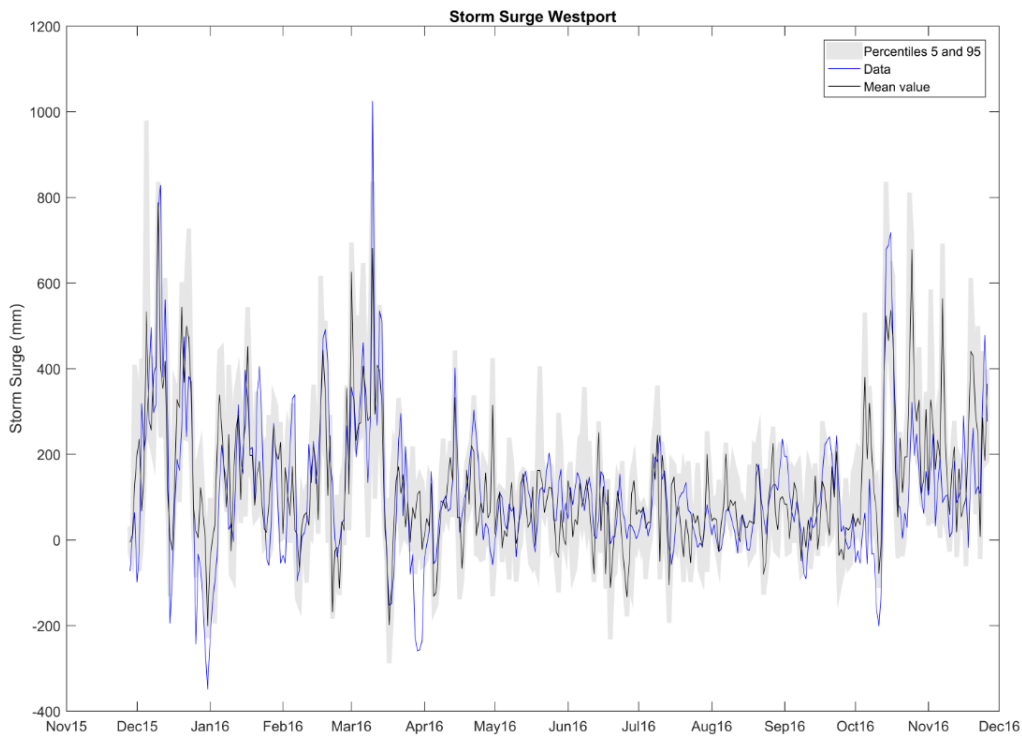


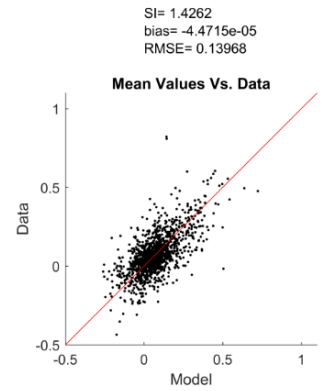
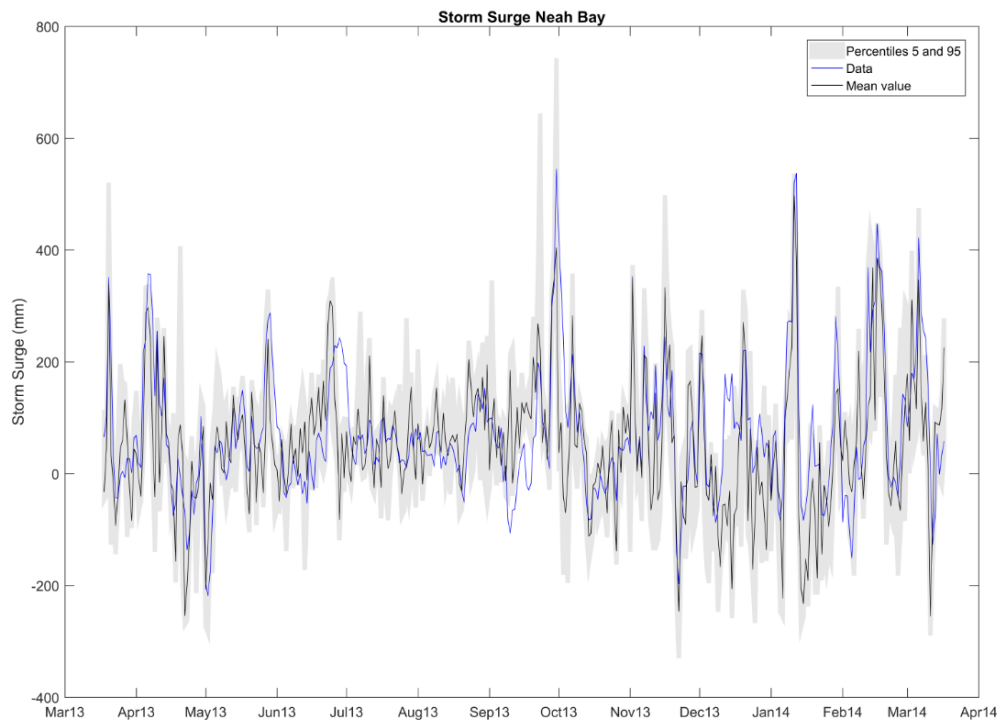






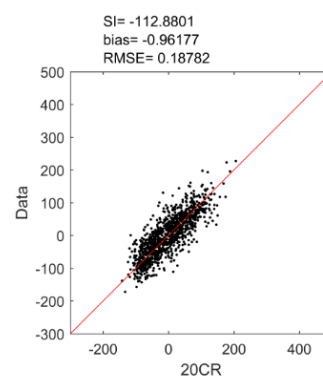
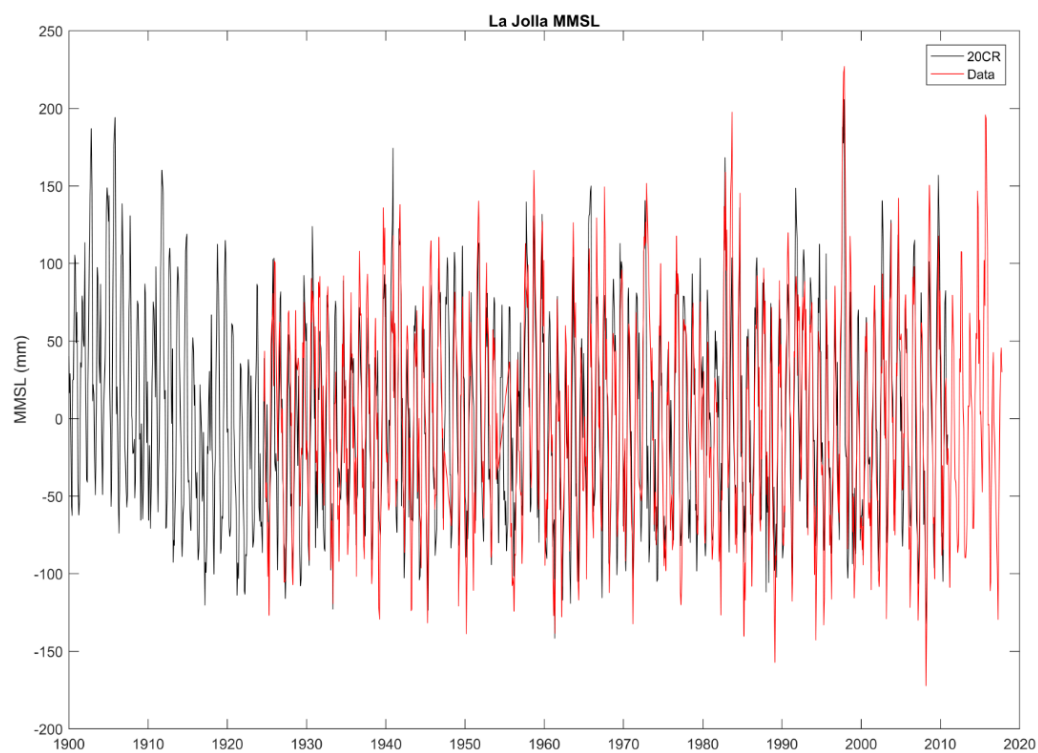
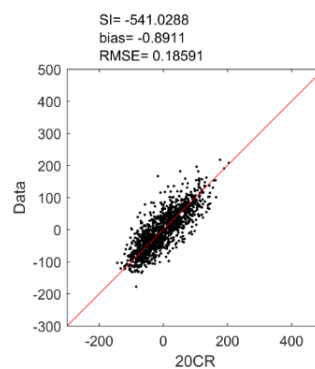
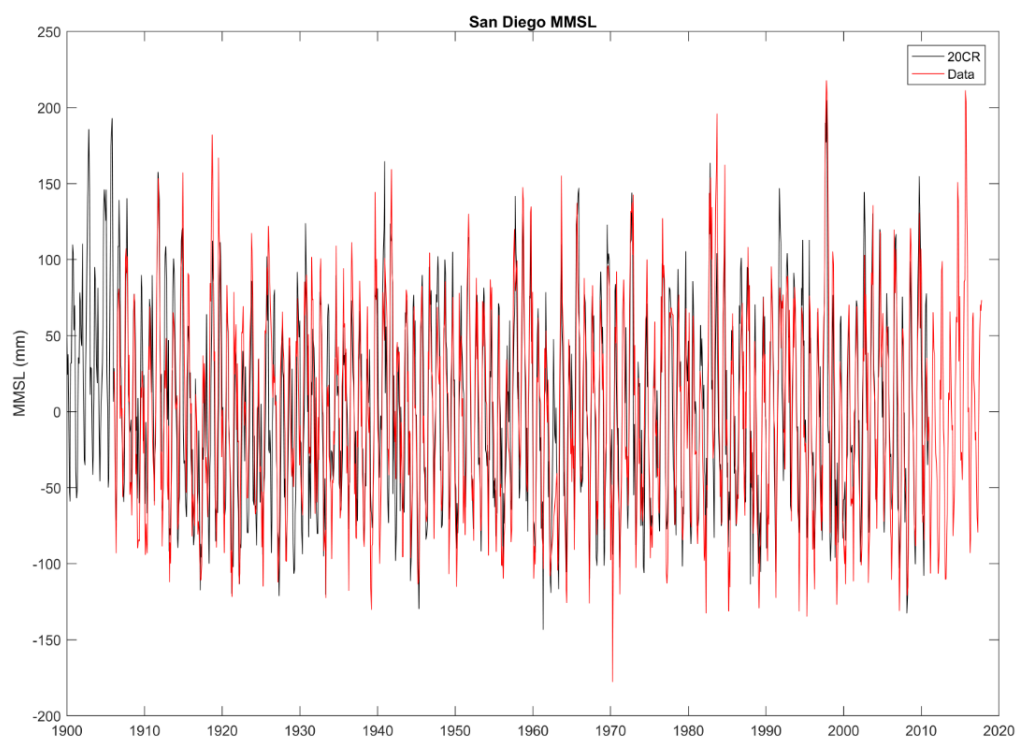


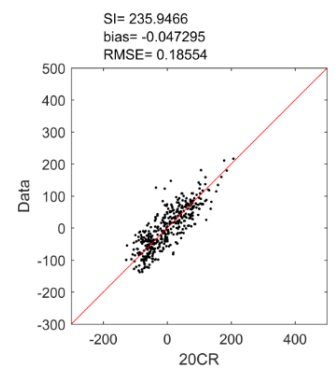
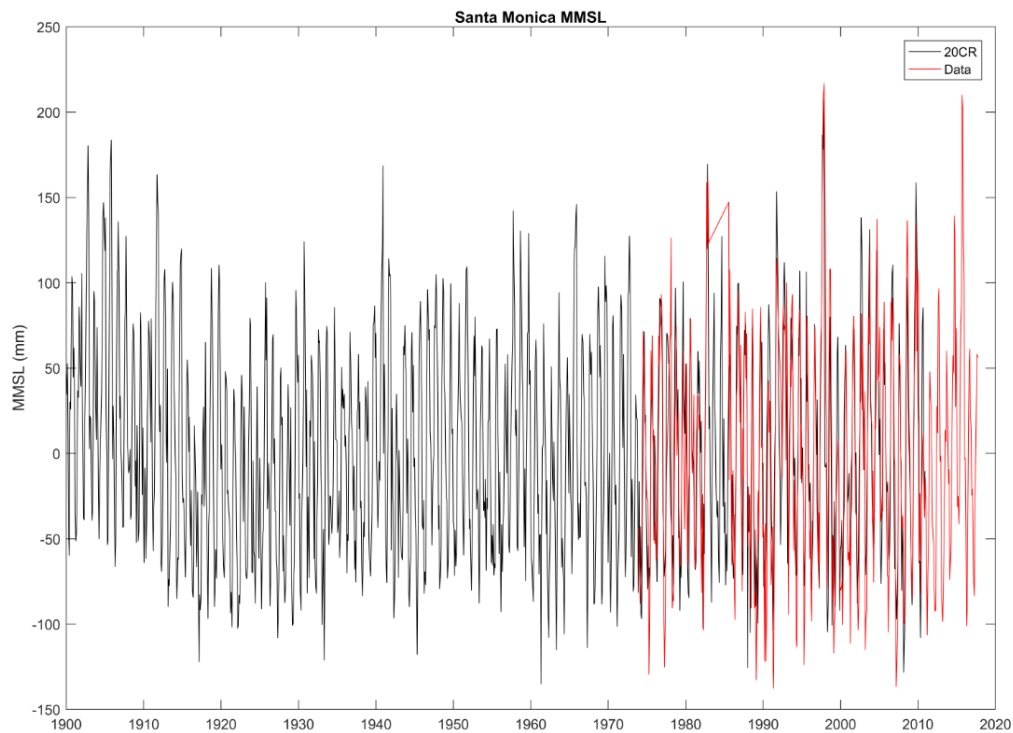
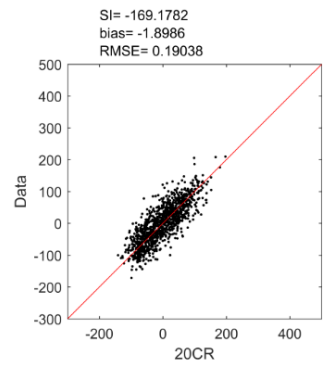
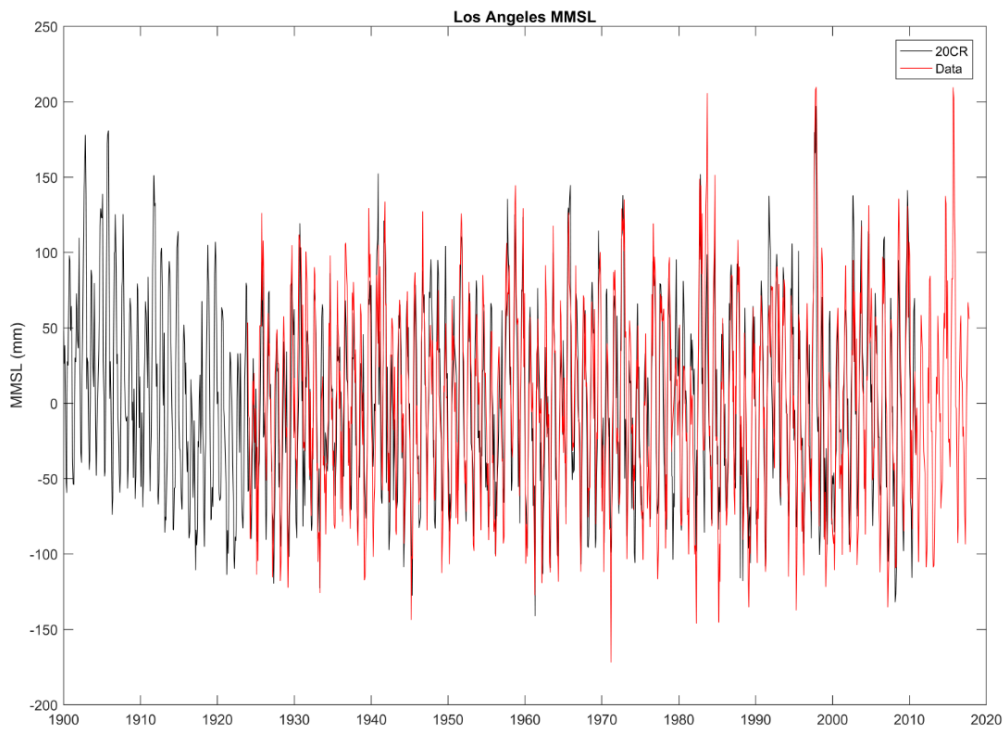


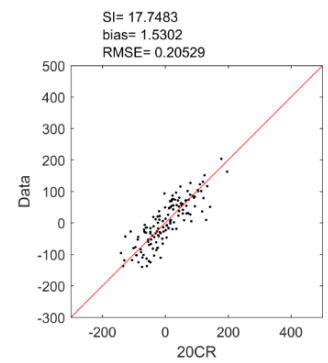
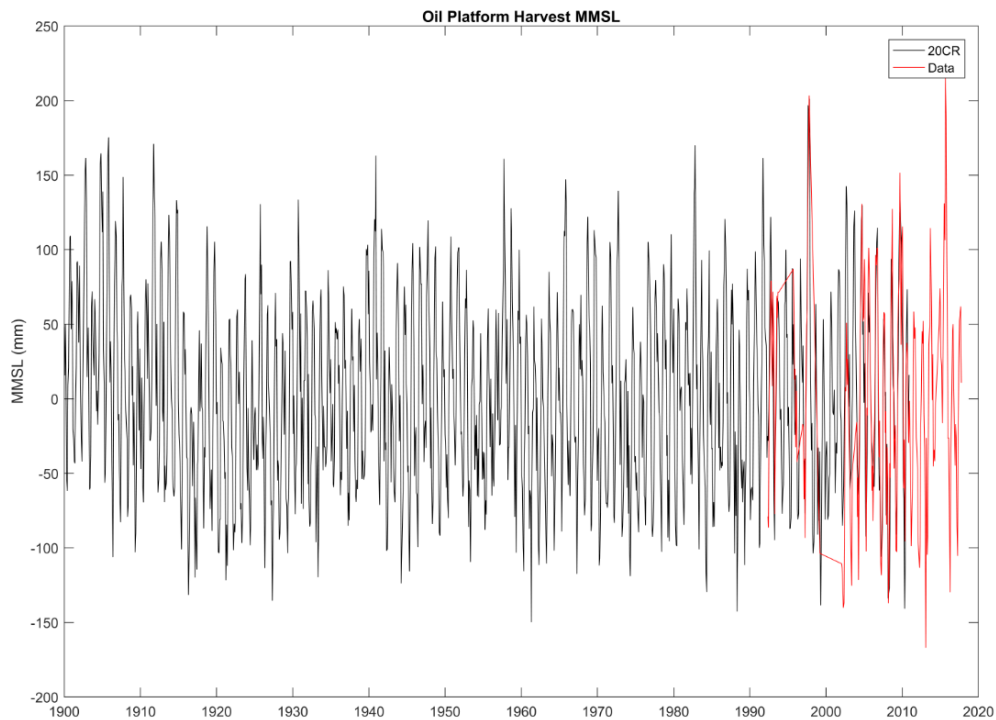
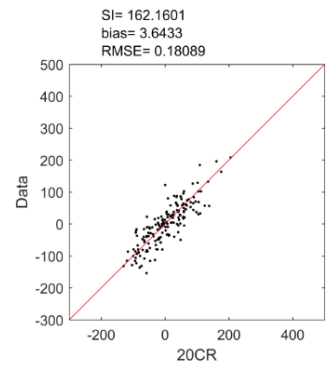
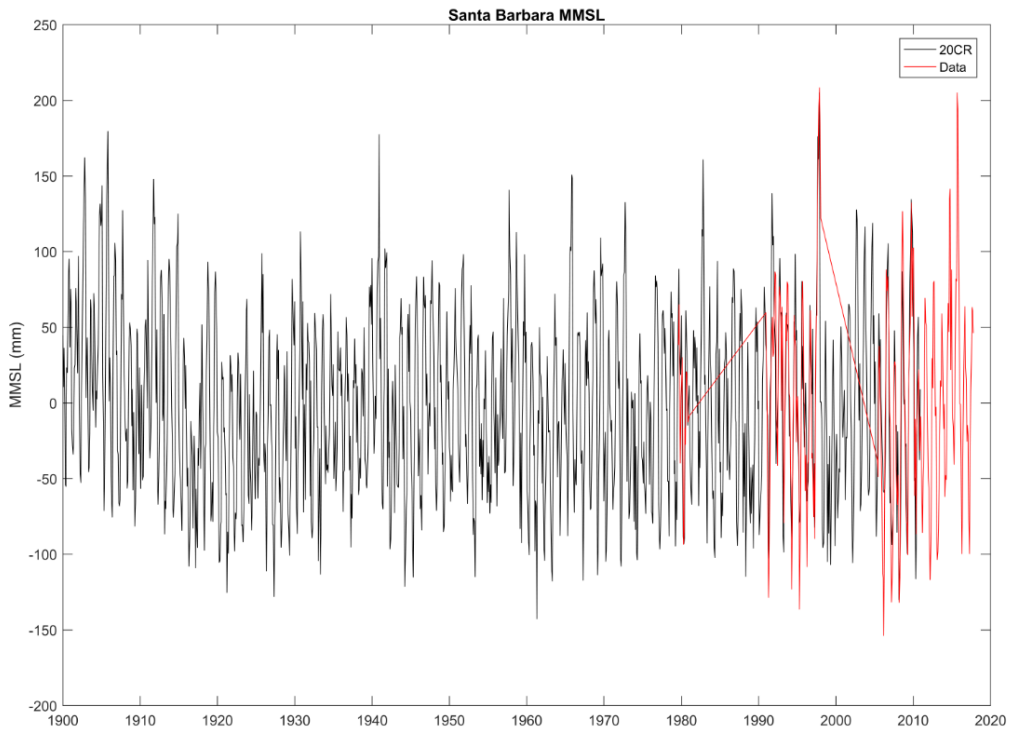


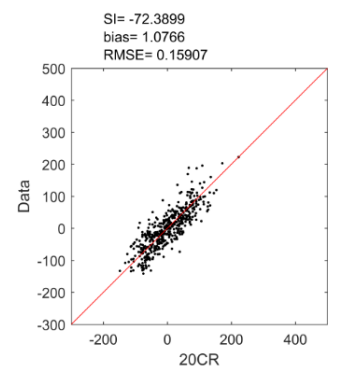
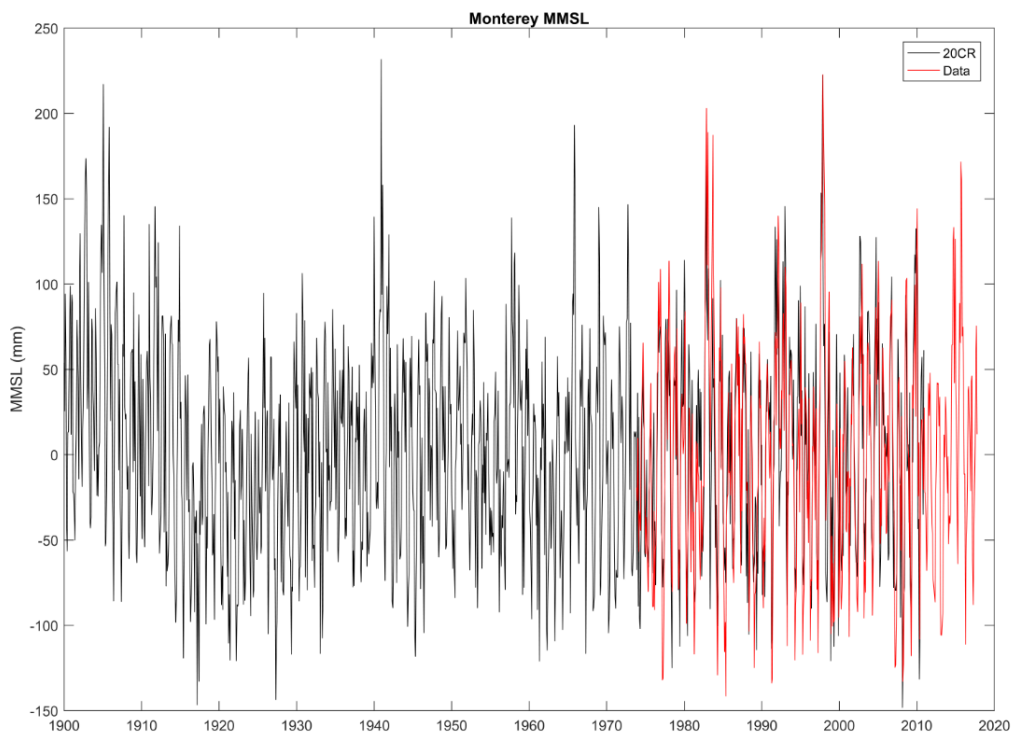
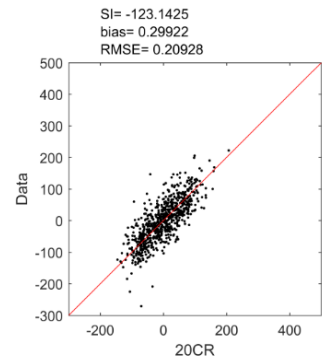
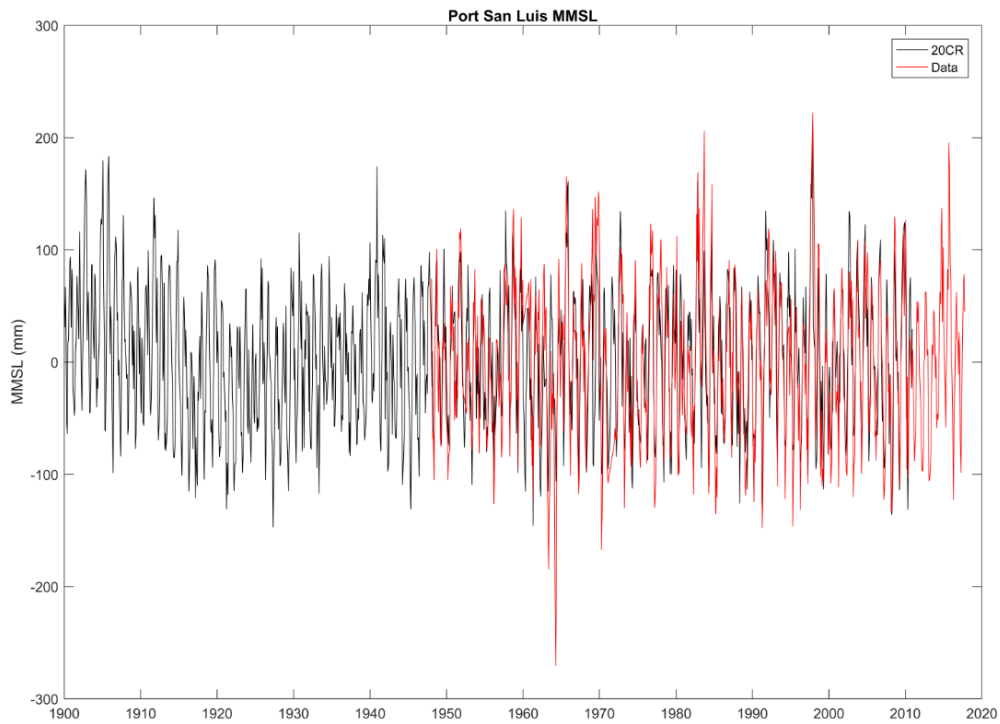
APÉNDICE 2

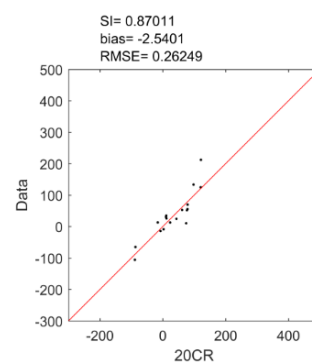
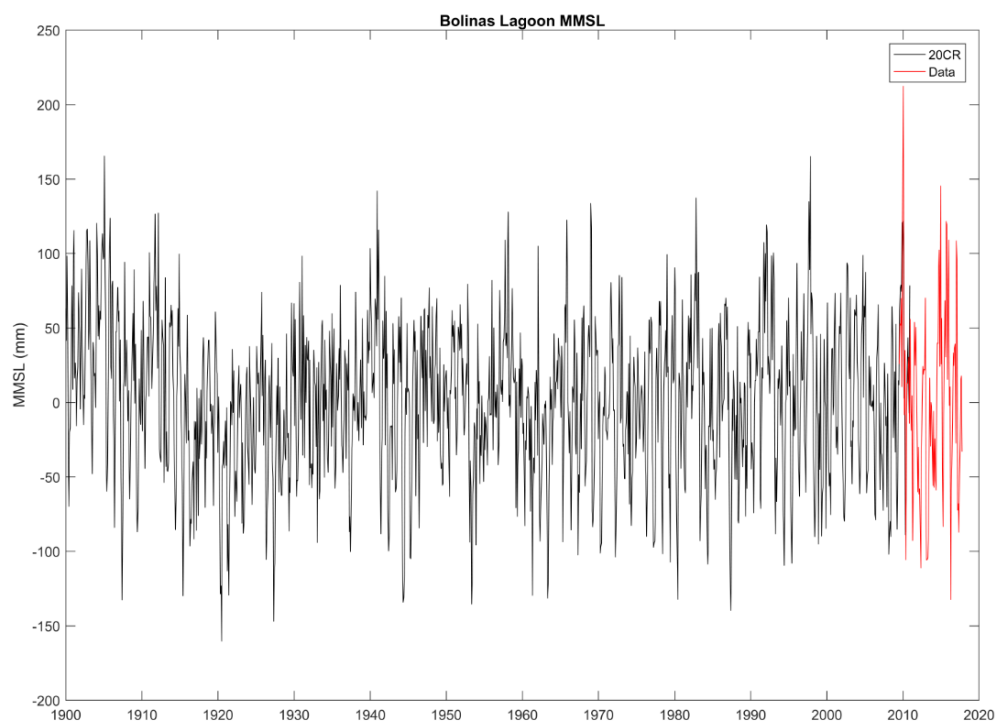
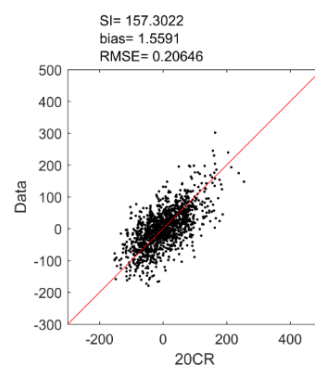
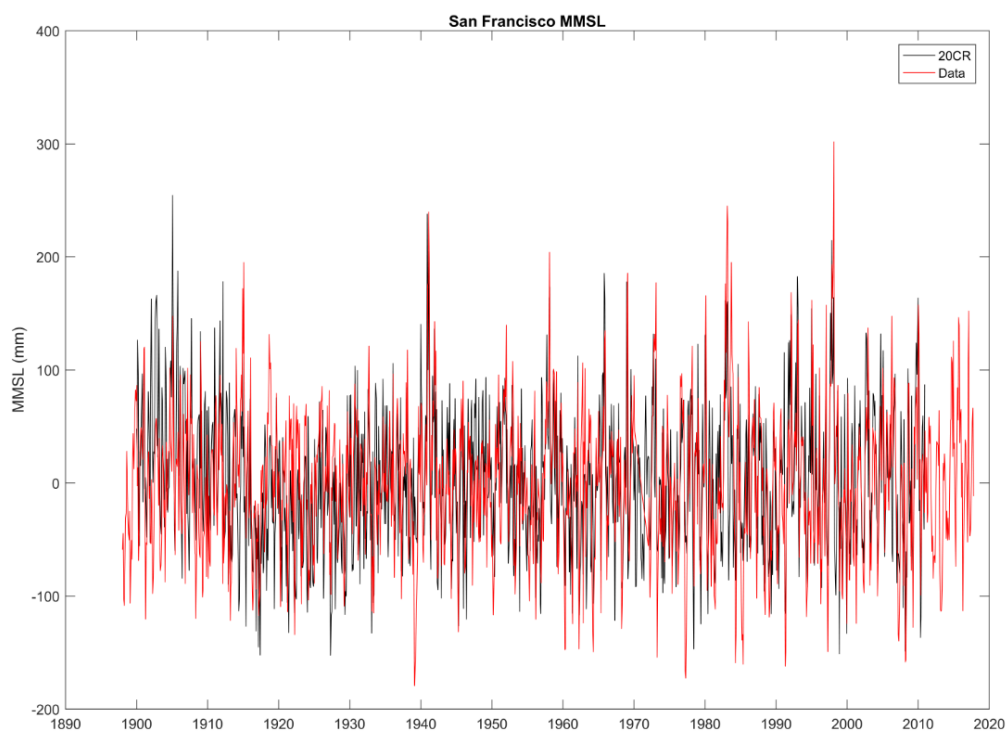
RESULTADOS DEL NIVEL MEDIO DEL MAR MENSUAL, 20CR

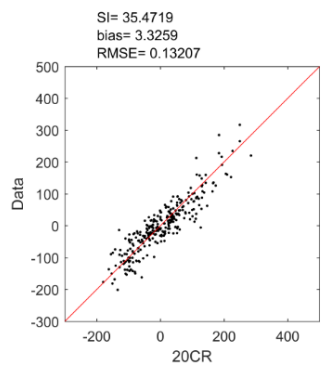
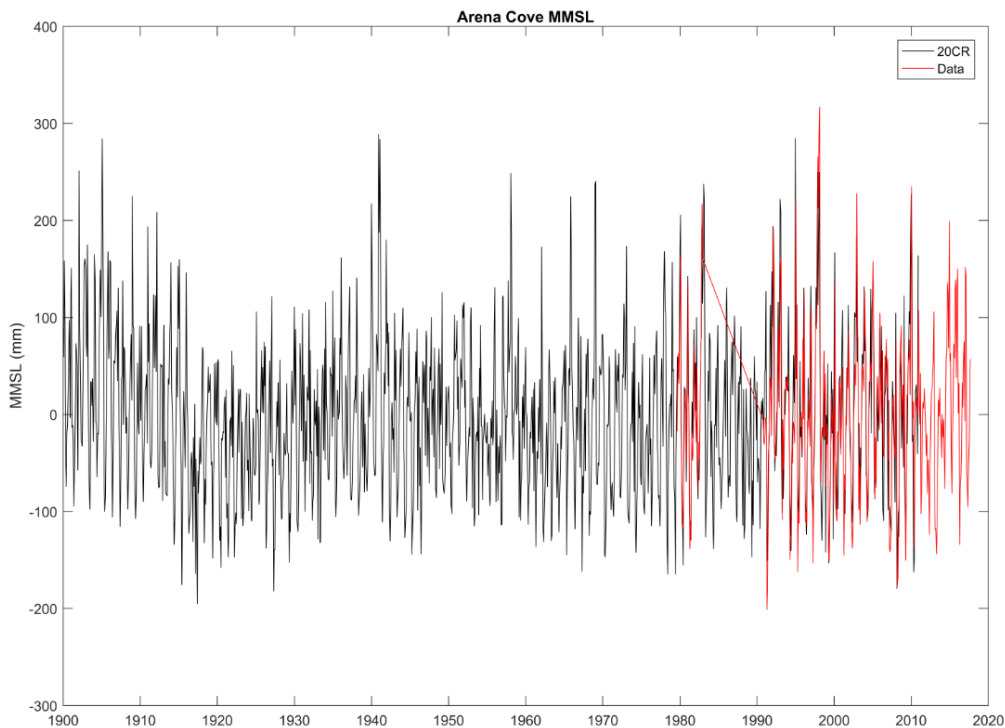
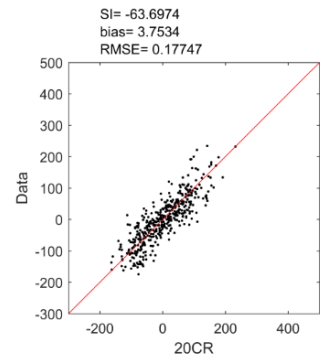
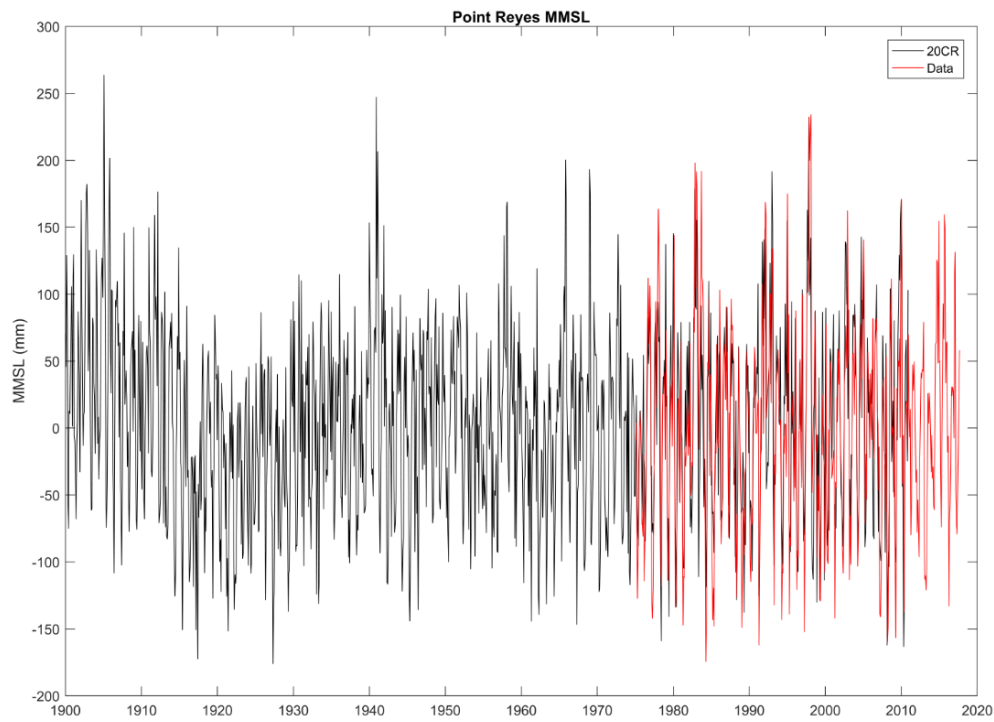


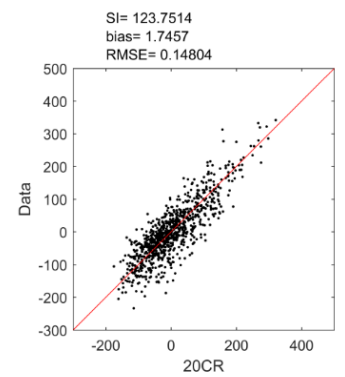
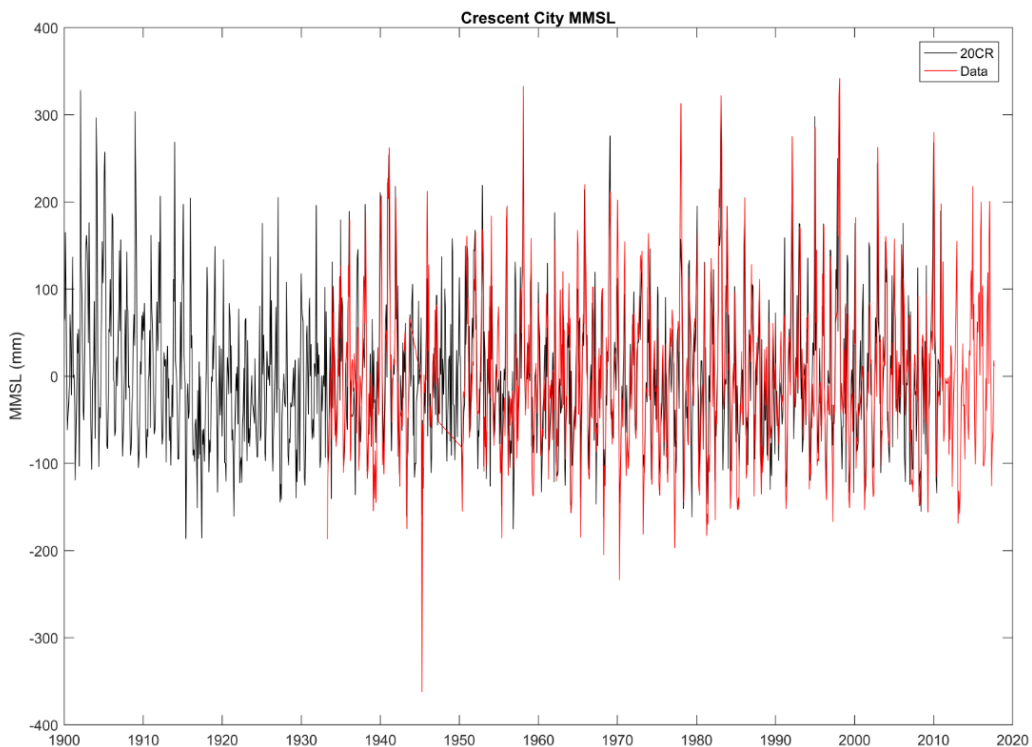
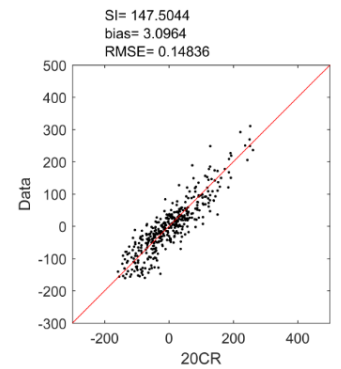
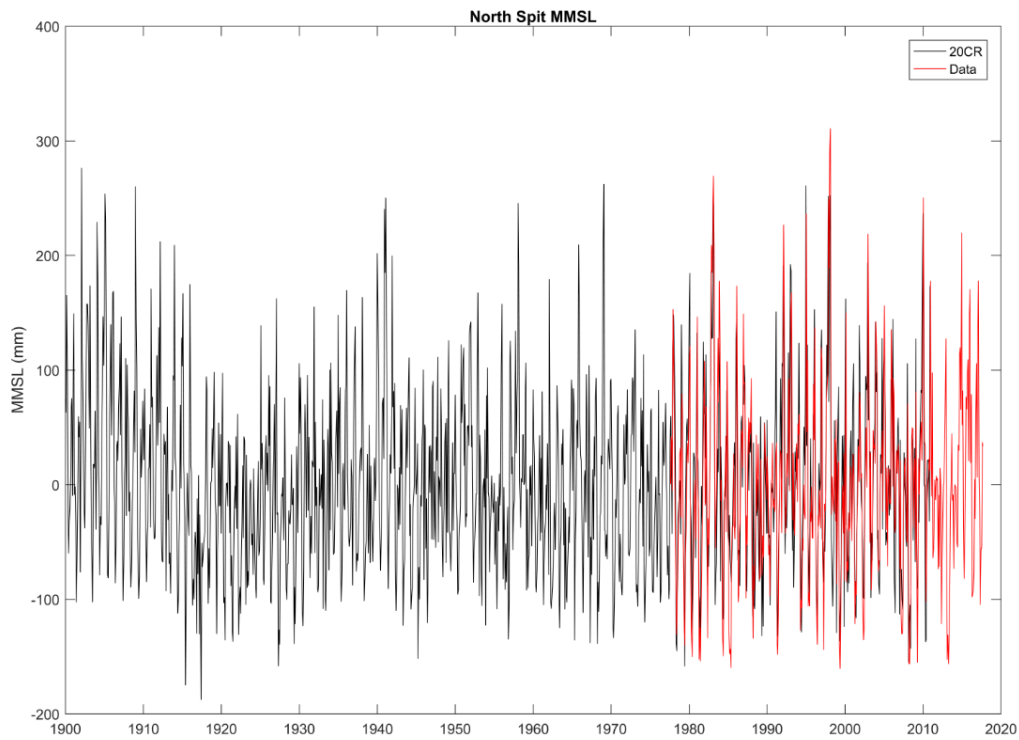


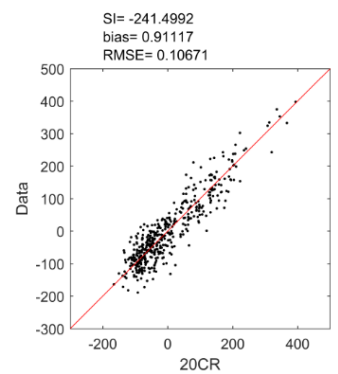
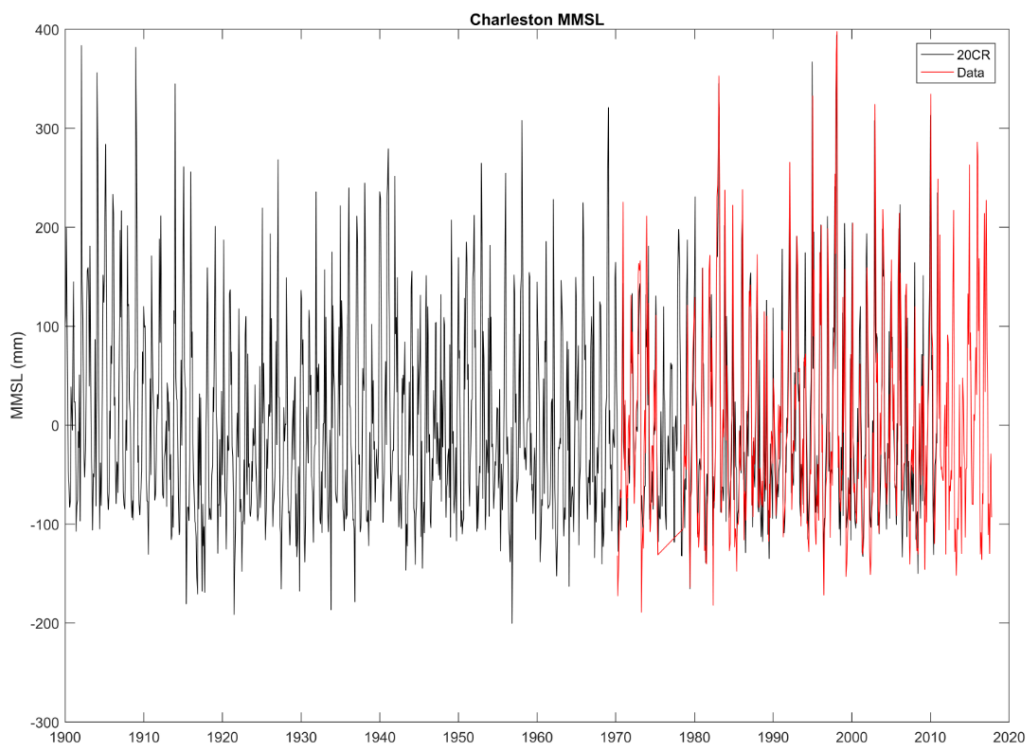
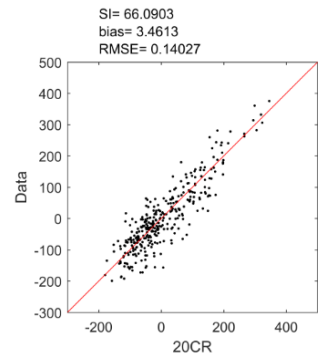
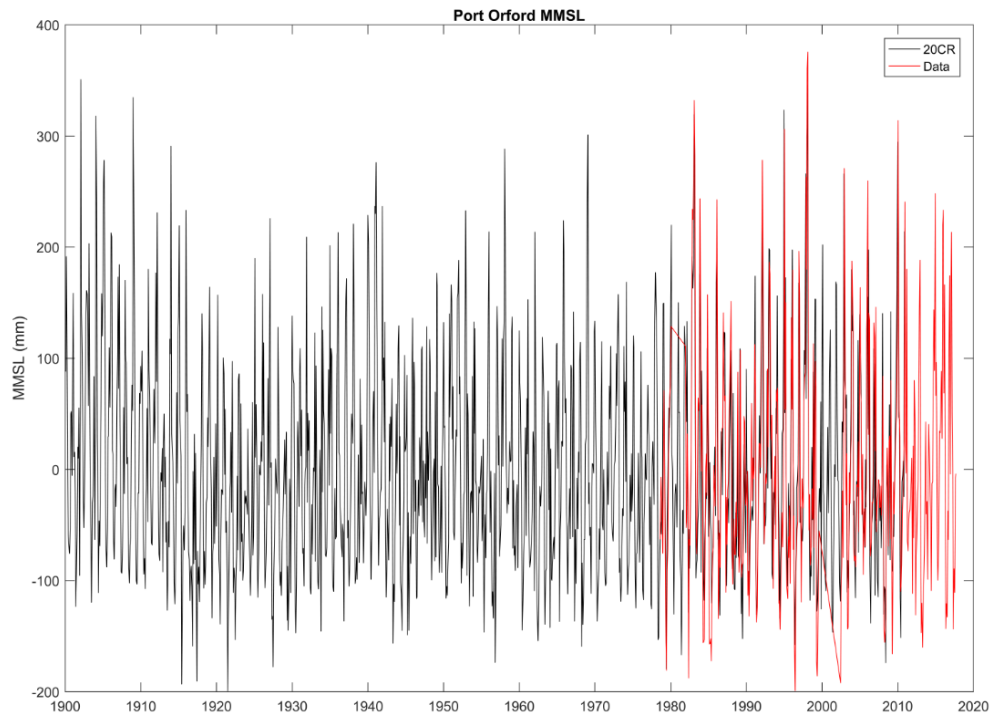


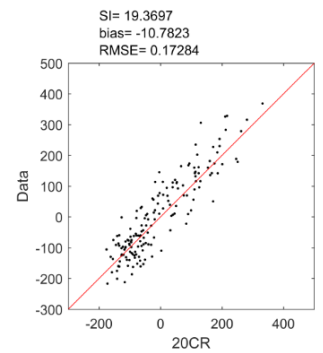
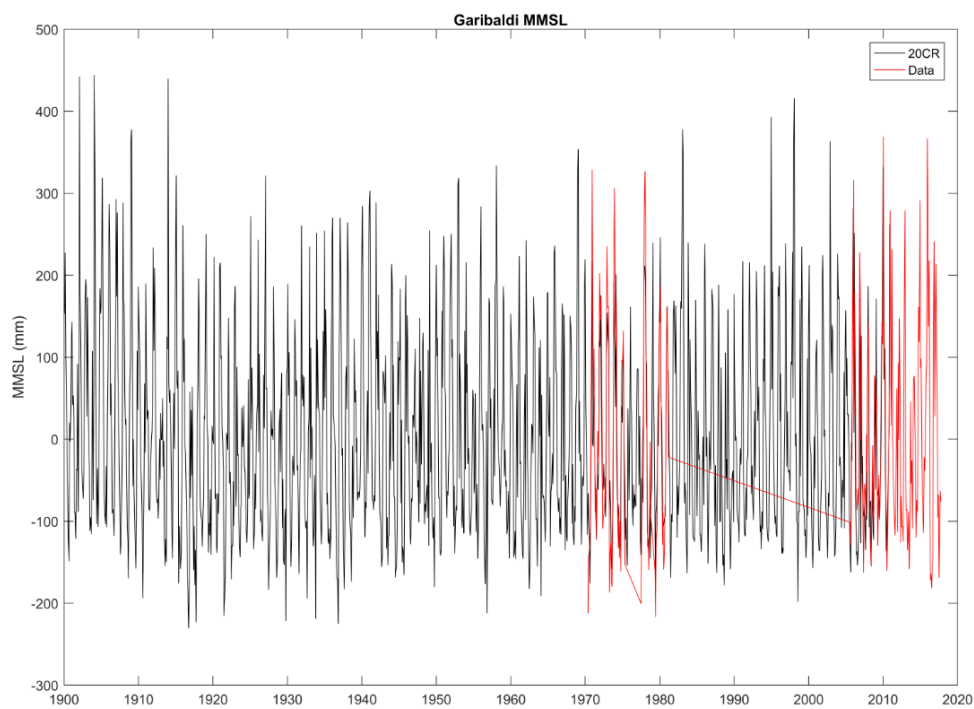
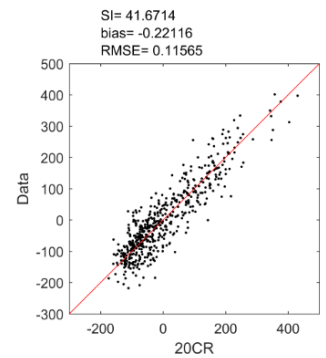
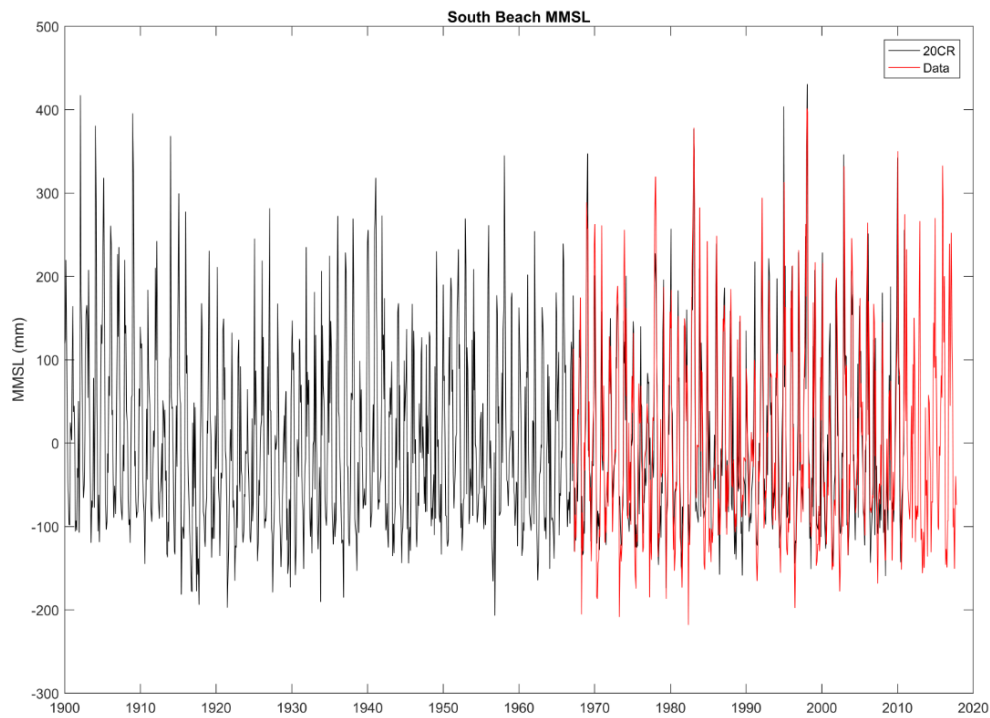


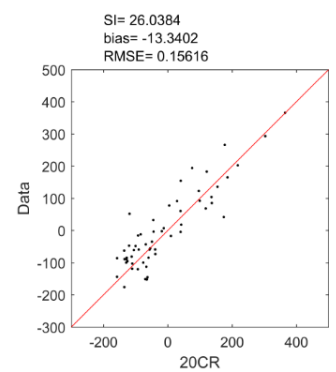
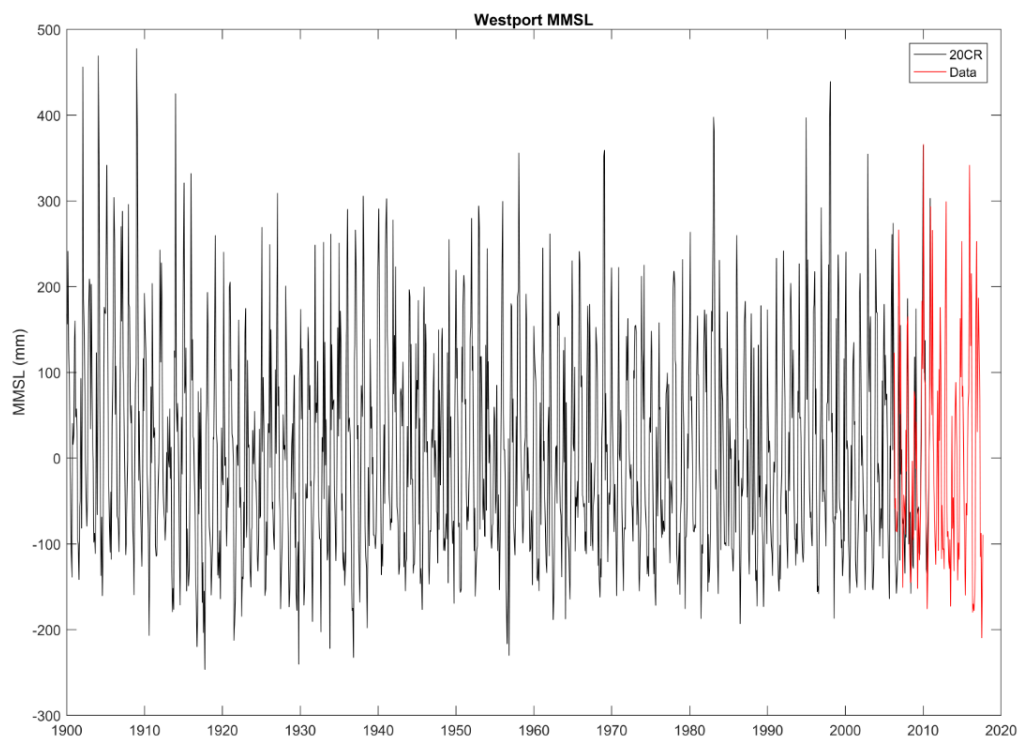
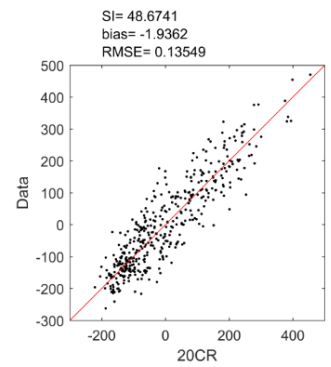
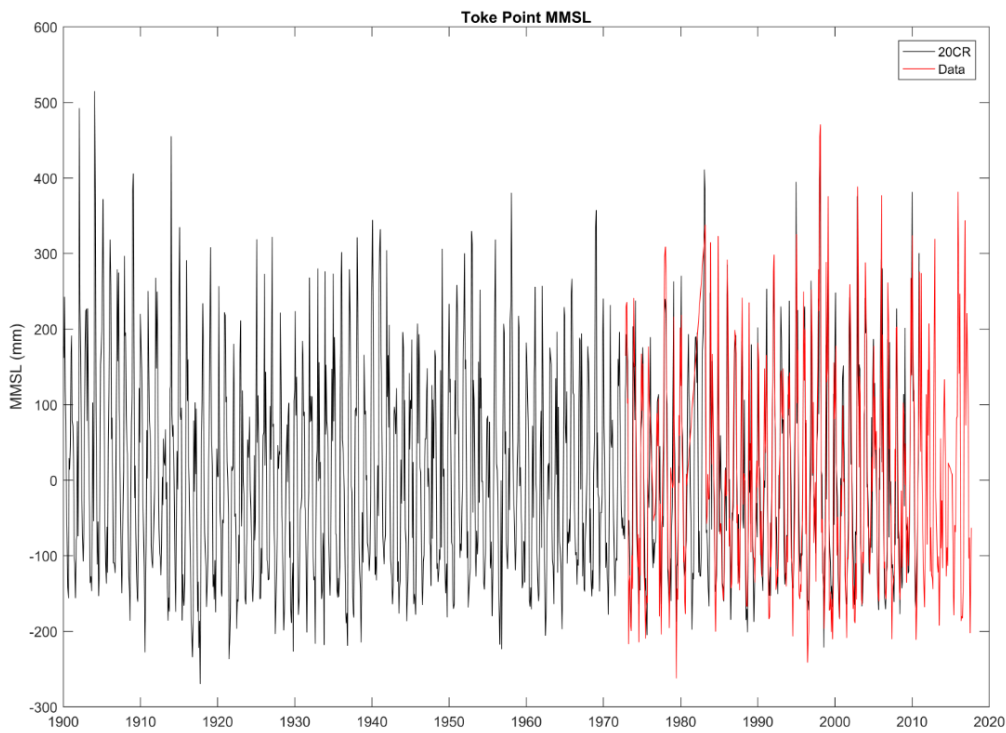


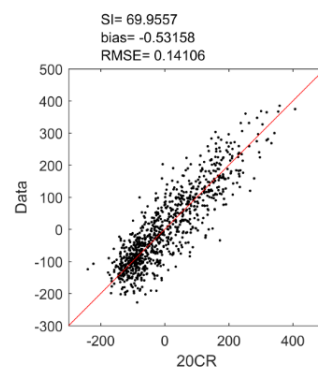
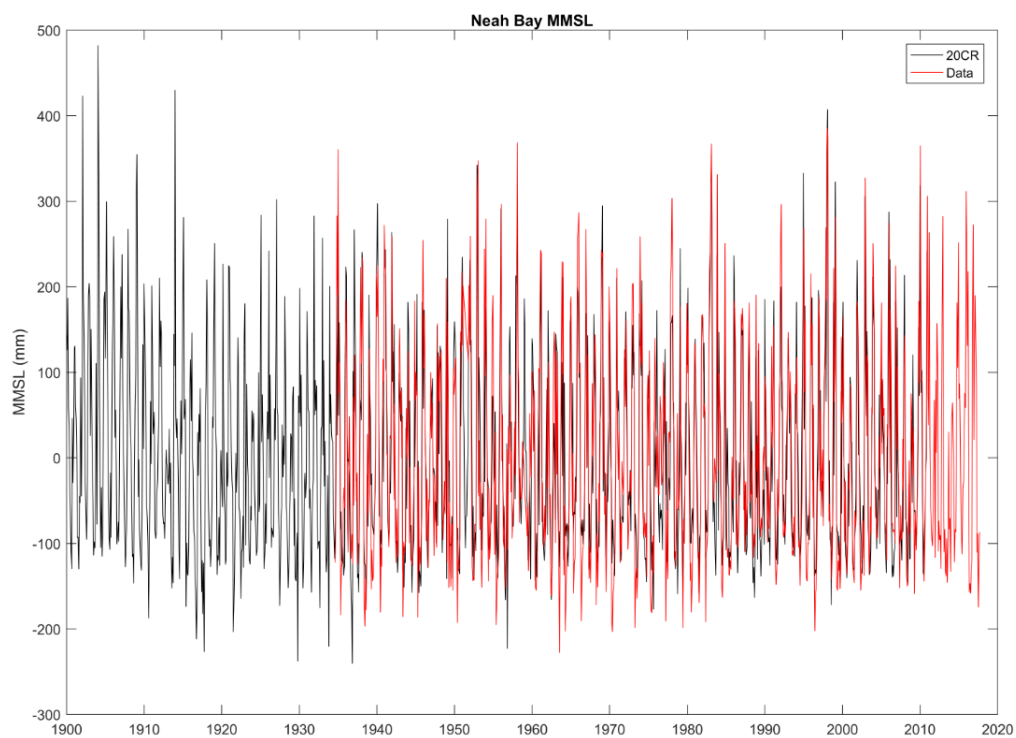
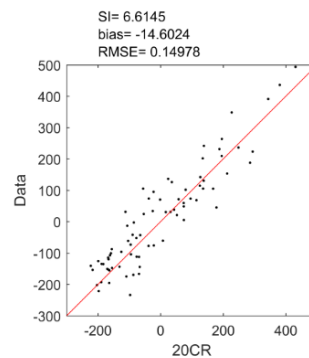
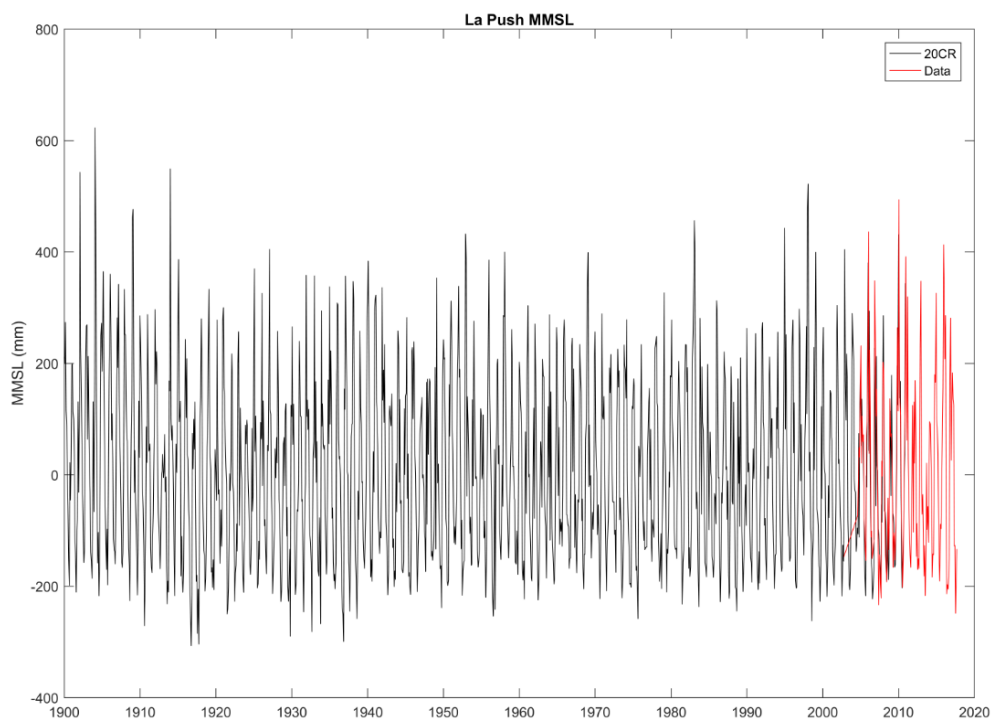














*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y
Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

